

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

**Pohonná jednotka laboratorního přípravku pro  
měření vlastností snímačů otáček a polohy**

**Drive Unit of Laboratory Stand for Measuring of  
Speed and Position Sensors**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal

V Ostravě 22. 4. 2011

---

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petrovi Šimoníkovi, Ph.D. za odborné rady, které mi poskytl v průběhu plnění mé diplomové práce.

**Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá pohonnou jednotkou laboratorního přípravku, který bude sloužit pro měření vlastností snímačů otáček a polohy motorových vozidel. Obsahem této práce je popis pohonné jednotky, rozdělení snímačů a čidel, pro které bude pohonná jednotka sloužit. Dále pak návrh a realizace měniče frekvence, výsledné měření a průvodní dokumentace k laboratornímu měření na přípravku, který bude využit při výuce v předmětu Automobilová elektronika II, k praktickému seznámení a ověření vlastností snímačů otáček a polohy.

**Klíčová slova:**

Snímače a čidla, pohonná jednotka, nepřímý měnič kmitočtu, střídač, asynchronní motor

**Abstract:**

Diploma thesis deals with the drive unit of the laboratory product, which will be used for measuring of speed and position sensors in vehicles. The content of this thesis is the description of the engine, sensors and sensitive elements division, for which will the power unit serve. Furthermore, the design and implementation of the frequency inverter, the resulting measurements and the accompanying documentation for laboratory measurements to a product, which will be used in education in the subject of Automotive Electronics II, for practical introduction and verification of performance speed and position sensors.

**Key words:**

Sensors and sensitive elements, drive unit, indirect frequency converter, inverter, asynchronous motor

### Seznam použitých zkratk:

1LA7	typové značení motoru
ABS	protiblokovací systém (Anti-lock Brake System)
AS	asynchronní stroj
CMOS/TTL	technologie
D1	dioda
DIP-SPM	typ pouzdra (Dual In Line – Smart Power Module)
DPS	deska plošných spojů
FRD	dioda
HVIC	budič tranzistoru
IC	čidlo
IGBT	typ tranzistoru (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MC	řídící systém MC3PHAC
NMK	nepřímý měnič kmitočtu
PC	stolní počítač
PWM	typ modulace (Pulse Width Modulation)
T1	tranzistor
VFO	výstup s otevřeným kolektorem

### Seznam použitých značek:

C	[F]	kapacita
f	[Hz]	frekvence
f <sub>REC</sub>	[Hz]	vlastní kmitočet
I	[A]	proud
I <sub>Cpeak</sub>	[A]	špičkový nabíjecí proud
I <sub>CRMS</sub>	[A]	efektivní nabíjecí proud
I <sub>DCpeak</sub>	[A]	špičkový vybíjecí proud
I <sub>DCRMS</sub>	[A]	efektivní vybíjecí proud
m	[-]	modulační poměr
M	[Nm]	moment motoru
M <sub>max</sub>	[Nm]	moment zvratu
n	[ot/min]	otáčky motoru
n <sub>p</sub>	[-]	modulační frekvenční poměr
R <sub>B</sub>	[Ω]	odpor
R <sub>th h-a</sub>	[K/W]	tepelný odpor chladič – okolí
R <sub>th j-c</sub>	[K/W]	tepelný odpor přechod – chladičí plocha modulu
s	[%]	poměrný skluz
t <sub>C</sub>	[s]	nabíjecí doba
t <sub>DC</sub>	[s]	vybíjecí doba
T <sub>j</sub>	[°C]	maximální teplota přechodu
U	[V]	napětí
u <sub>d</sub>	[V]	napětí na zátěži
U <sub>d(AV)</sub>	[V]	střední hodnota usměrněného napětí
U <sub>H</sub>	[V]	Hallovo napětí
U <sub>max</sub>	[V]	maximální napětí
U <sub>min</sub>	[V]	minimální napětí
U <sub>ref</sub>	[V]	referenční napětí
U <sub>z1</sub>	[V]	fázové napětí
U <sub>z12</sub>	[V]	sdružené napětí
Ψ	[°]	úhel sepnutí

## Obsah:

<b>1. Úvod</b>	7
<b>2. Snímače a čidla</b>	8
2.1. Odporové snímače polohy	8
2.2. Odporové snímače teploty	9
2.3. Elektromagnetické snímače	9
2.4. Snímače otáček	10
2.5. Hallovy snímače	10
<b>3. Pohonná jednotka</b>	11
3.1. Třífázový motor	12
3.1.1. Asynchronní motor 1LA7	15
3.1.2. Asynchronní motor 1LA7073-4AB10	16
3.2. Měníč frekvence	17
3.2.1. Usměrňovače	17
3.2.2. Stejnoseměrný meziobvod	18
3.2.3. Střídače	19
3.3. Pracovní mechanismus	23
3.4. Laboratorní pracoviště	24
<b>4. Nepřímý měnič kmitočtu</b>	27
4.1. Komparační PWM modulace	27
4.1.1. Komparační PWM modulace s přidáním třetí harmonické	28
4.2. Vektorová PWM modulace	29
<b>5. Návrh a realizace nepřímého měniče kmitočtu</b>	31
5.1. Výkonová část	32
5.1.1. Usměrňovač	32
5.1.2. Stejnoseměrný meziobvod	32
5.1.3. Střídač	34
5.1.4. Návrh chladiče	37
5.1.5. Navržené schéma výkonové části nepřímého měniče kmitočtu	39
5.1.6. Popis schématu výkonové části nepřímého měniče kmitočtu	39
5.1.7. Realizovaná deska výkonové části nepřímého měniče kmitočtu	40
5.2. Řídicí část	41
5.2.1. Řídicí systém	41
5.2.2. Navržené schéma řídicí části nepřímého měniče kmitočtu	42
5.2.3. Popis schématu řídicí části nepřímého měniče kmitočtu	42
5.2.4. Realizovaná deska řídicí části nepřímého měniče kmitočtu	43
<b>6. Měření</b>	44
6.1. Měření řídicí části	46
6.2. Měření výkonové části	46
6.2.1. Regulace otáček	47
6.2.2. Spínací frekvence	50
<b>7. Typizovaná laboratorní úloha</b>	52
<b>8. Závěr</b>	53

## 1. Úvod

V dnešní době se snímače a čidla využívají skoro ve všech oblastech průmyslu. Je tomu tak i u automobilového průmyslu. V současné době veškeré automobily obsahují různé snímače a čidla pro měření různých veličin, pro kontrolu a hlavně pro bezpečí posádky vozidla. Dalo by se říct, že snímače jsou smyslovými orgány vozidla. Tím pádem snímače musí být přesné a spolehlivé, proto procházejí různými kontrolami a testy.

V této diplomové práci je zahrnuto rozdělení snímačů, ale hlavní oblast řešení je zaměřena na návrh a realizaci přípravku pro laboratorní ověření snímačů otáček a polohy motorových vozidel. Jedná se o pohonnou jednotku, která je tvořena nepřímým měničem kmitočtu a motorem, pohánějící pracovní mechanismus, ke kterému jsou připojeny snímače ke snímání rychlosti otáčení kol. Tato diplomová práce obsahuje popis, návrh a realizaci pohonné jednotky laboratorního přípravku pro měření vlastností snímačů polohy a otáček a laboratorní úlohu s průvodní dokumentací k danému modelu. Tento model budou využívat studenti předmětu Automobilová elektronika II, díky němuž se studenti prakticky seznámí se snímači a ověří jejich vlastnosti.

## 2. Snímače a čidla

V dnešní výrobě motorových vozidel jsou kladeny velké nároky na bezpečnost jízdy, hospodárnost, komfort a šetrnost vůči životnímu prostředí. Proto čím dál, tím více jsou automobily vybaveny elektronickými systémy a tím pádem celou řadou snímačů a čidel. Umožňují měření důležitých provozních veličin a jejich přenos na přístrojovou desku nebo k dalšímu zpracování. Výstupní elektrický signál snímače může být analogový (spojitý) nebo digitální (číslicový) a může být zpracováván přímo nebo uložen do paměti řídicí jednotky. Úkolem snímačů je převádět neelektrickou veličinu na elektrickou. Sledování můžeme provádět průběžným měřením (snímač poskytuje informaci o aktuálním stavu), nebo signalizovat jen určité stavy (teplota, množství, atd.). Nejjednodušším snímačem je čidlo, jehož signál o měřené veličině není upravován, nebo měněn na jiný signál. [1]

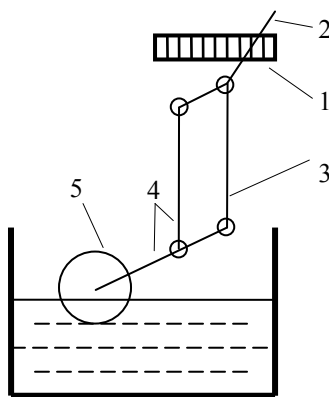
Základní rozdělení snímačů:

- **aktivní**
  - při působení neelektrické veličiny se chovají jako zdroj elektrické energie
- **pasivní**
  - ke své činnosti vyžadují zdroj elektrické energie

Snímače (aktivní i pasivní) se z hlediska kontaktu s měřeným objektem rozdělit na dotykové snímače a bezdotykové snímače.

### 2.1. Odporové snímače polohy

Tyto snímače polohy se využívají tam, kde je nutné znát polohu mechanických komponentů, jako je například poloha škrtící klapky, poloha pedálu akcelerace, výška hladiny paliva v nádrži atp. Takovým jednoduchým a spolehlivým snímačem je proměnný rezistor, zapojený jako měřicí *potenciometr* nebo *reostat*. Použití potenciometrického snímače je typické např. pro měření obsahu paliva v nádrži, který má za úkol snímat aktuální stav hladiny palivové nádrže a dodávat signál řídicí jednotce. [1]



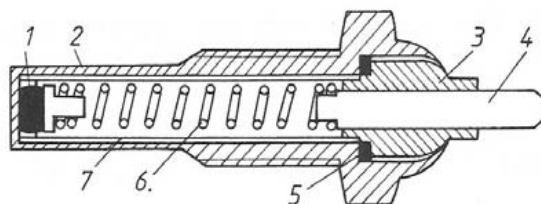
Obr. 2.1. Snímač výšky hladiny paliva v nádrži

1 – odporová dráha, 2 – jezdec, 3 – pevná vzpěra, 4 – rameno, 5 – plovák



## 2.2. Odporové snímače teploty

Mezi další důležité veličiny, které je třeba snímat je teplota. Pro snímání této veličiny se nejčastěji používají termistory, nebo kovové odporové snímače. Termistor je polovodičová součástka s nelineární závislostí odporu na teplotě (s rostoucí teplotou klesá odpor). Nevýhodou těchto termistorů je časová nestabilita odporu. Pro přesná měření teploty se používají odporové teploměry kovové, nejčastěji odporové čidlo Pt 100. V obou případech odporových snímačů se teplota měří v nejjednodušším případě tak, že snímač je zapojen do obvodu s konstantním proudem a napětí na snímači pak odpovídá určité teplotě. [1]

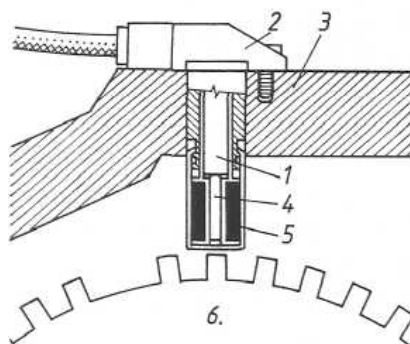


Obr. 2.2. Termistorový snímač teploty

1 – termistor, 2 – těleso snímače, 3 – izolační průchodka, 4 – konektor,  
5 – těsnicí podložka, 6 – pružina, 7 – izolační vložka

## 2.3. Elektromagnetické snímače

S těmito snímači se můžeme setkat při měření otáček, úhlové rychlosti otáčivého pohybu, nebo při měření polohy. Jsou často využívány díky své spolehlivosti a jednoduchosti. U těchto elektromagnetických snímačů se mění magnetický tok změnou magnetického odporu magnetického obvodu. Klasické provedení elektromagnetických snímačů je zobrazeno na obrázku Obr. 2.3., jedná se o snímač s otevřeným magnetickým obvodem pro měření otáček. Otáčením kola se zuby se mění velikost vzduchové mezery mezi kolem a snímačem a tím dochází ke změně magnetického toku. Frekvence napětí je úměrná otáčkám a počtu zubů a při vhodně zvoleném počtu zubů (např. 60) a době čítání impulsů snímače (např. 1s), ukazuje přístroj přímo otáčky za minutu. [1]

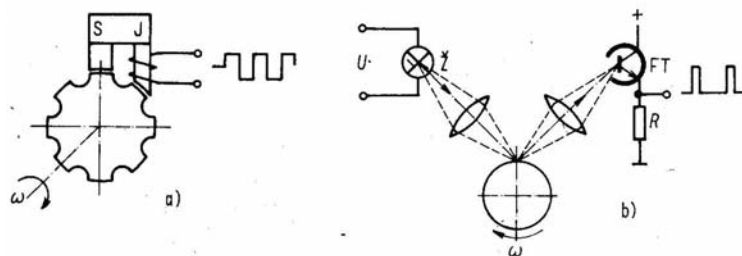


Obr. 2.3. Elektromagnetický (indukční) snímač

1 – permanentní magnet, 2 – držák snímače, 3 – skříň motoru,  
4 – pólový nástavec, 5 – cívka, 6 – ozubení (např. věnec setrvačníku)

## 2.4. Snímače otáček

Umožňují kontrolu a regulaci otáček. První snímače byly odstředivé (odstředivá síla v zátěži je úměrná rychlosti otáčení), nyní se používají optické, magnetické a elektrické. Výhodou těchto snímačů je bezkontaktní provedení a skutečnost, že nejsou spojeny mechanicky s měřenou hřídelí. [1]

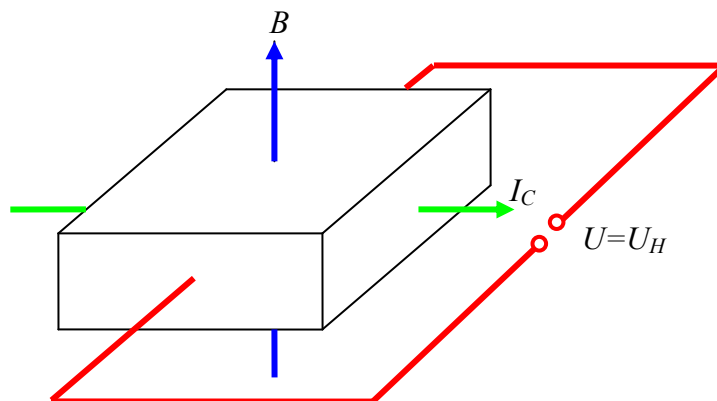


Obr. 2.4. Impulsové snímače otáček

a) indukční impulsový snímač, b) fotoelektrický impulsový snímač

## 2.5. Hallové snímače

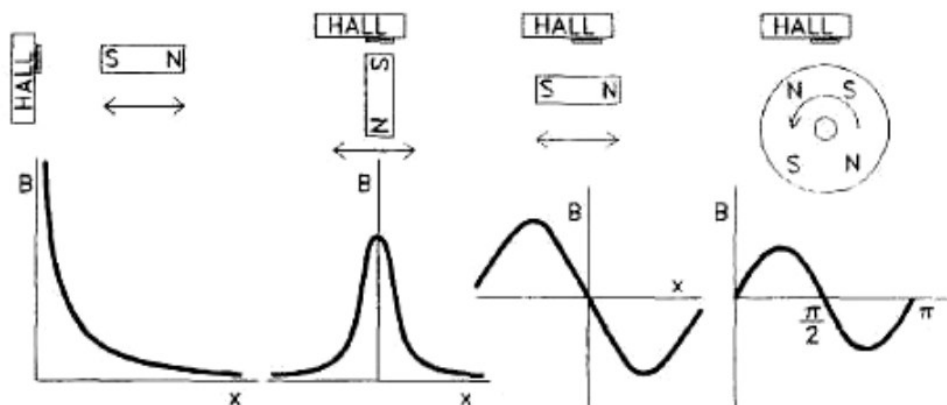
Princip těchto snímačů spočívá v Hallovém jevu. Jedná se o tenkou vodivou destičku z kovu, nebo polovodiče, kterou prochází elektrický proud a magnetické pole. Působením magnetické síly vzniká Hallovo napětí, které je možno změřit. Budou-li proud a magnetická indukce na sebe kolmé, potom příčně ke směru proudu naměříme Hallovo napětí  $U_H$ , toto napětí je možné detekovat, zesílit a dále zpracovávat. [1]



Obr. 2.5. Princip Hallova jevu

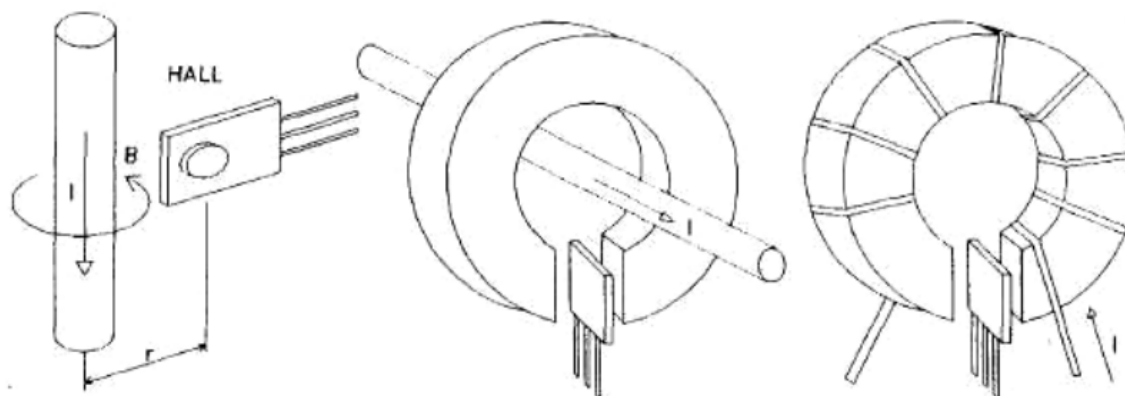
$$U_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_C \cdot B \cdot \sin \Theta \quad (2.1)$$

kde:	$R_H$	Hallova konstanta
	$d$	tloušťka polovodičového vzorku
	$I_C$	vstupní proud
	$B \cdot \sin \Theta$	složka magnetické indukce



Obr. 2.6. Závislost magnetické indukce na způsobu pohybu magnetu

Nejběžnější aplikace Hallových senzorů jsou snímání otáček spalovacích motorů, systém ABS, snímání rychlosti jízdy, průtoky kapalin, atd.



Obr. 2.7. Různé metody měření proudu pomocí Hallový sondy

### 3. Pohonná jednotka

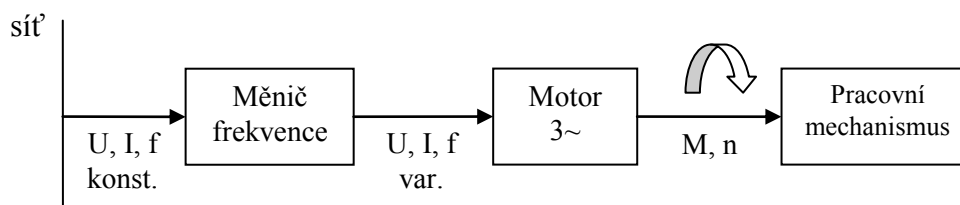
Abychom mohli snímat vlastnosti jednotlivých snímačů, je třeba vytvořit simulační prostředí. Simulační prostředí, které bude pohánět ozubená kola, nad kterými budou připevněny snímače otáček a polohy. Pohonná jednotka musí být napájena ze sítě a musí být schopna regulovat otáčky a akceleraci.

Hlavní kritéria pohonné jednotky:

- měření vlastností snímačů,
- jednoduchá konstrukce,
- simulace nejčastějších příčin závad.

Takováto jednoduchá pohonná jednotka je tvořena:

- *měníčem frekvence,*
- *motorem,*
- *pracovním mechanismem,*
- *laboratorním stanovištěm.*



Obr. 3.1. Blokové schéma pohonné jednotky

Hlavní částí je motor, napájený z měniče frekvence, který roztáčí pracovní mechanismus. Díky frekvenčnímu měniči můžeme regulovat rychlost i akceleraci otáčení ozubených kol. Tento model slouží ke snímání veškerých indukčních nebo Hallových snímačů sloužících pro měření otáček. Ovšem lze měřit i dynamické vlastnosti snímačů, např. vliv velikosti vzduchové mezery, nebo obvodové házení ozubení a otáček na výstupní signál.

Hlavní parametry modelu pohonné jednotky, kterými disponuje, jsou:

- *simulace měření otáček klikového a váčkového hřídele spalovacího motoru,*
- *pohon trojfázovým asynchronním motorem řady 1LA7,*
- *frekvenční řízení motoru,*
- *regulace rychlosti motoru,*
- *měření indukčních a Hallových snímačů.*

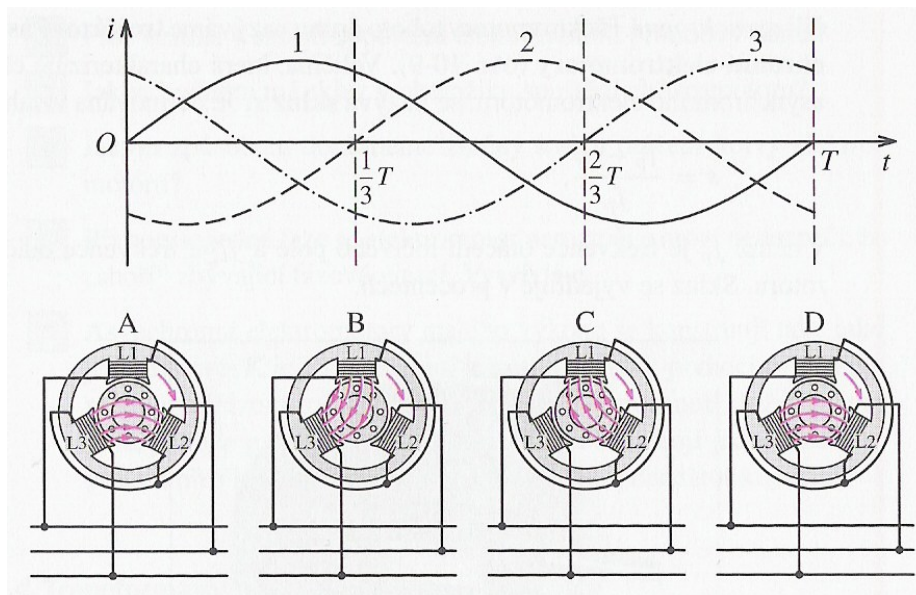
Následně budou popsány jednotlivé části pohonné jednotky.

### 3.1. Třífázový motor

Asynchronní stroje se vyznačují jednoduchou konstrukcí a prakticky bezúdržbovým provozem. Velké rozšíření těchto strojů nastalo při rozvoji střídavých distribučních a napájecích sítí, díky jednoduchému přímému připojení na síť. V dřívějších letech vznikaly proudové nárazy a velký odběr jalového výkonu, což způsobovalo značné problémy. Díky novým poznatkům ve výkonové elektronice, kdy byly vyřešeny problémy s kmitočtovým řízením rychlosti asynchronních strojů, dnes tyto motory dominují i v oblasti regulovaných pohonů. [2]

Princip činnosti střídavých točivých strojů spočívá ve vzniku magnetického pole. Pole vzniká u stroje, napájený soustavou střídavých proudů (s časovým posunem jednotlivých

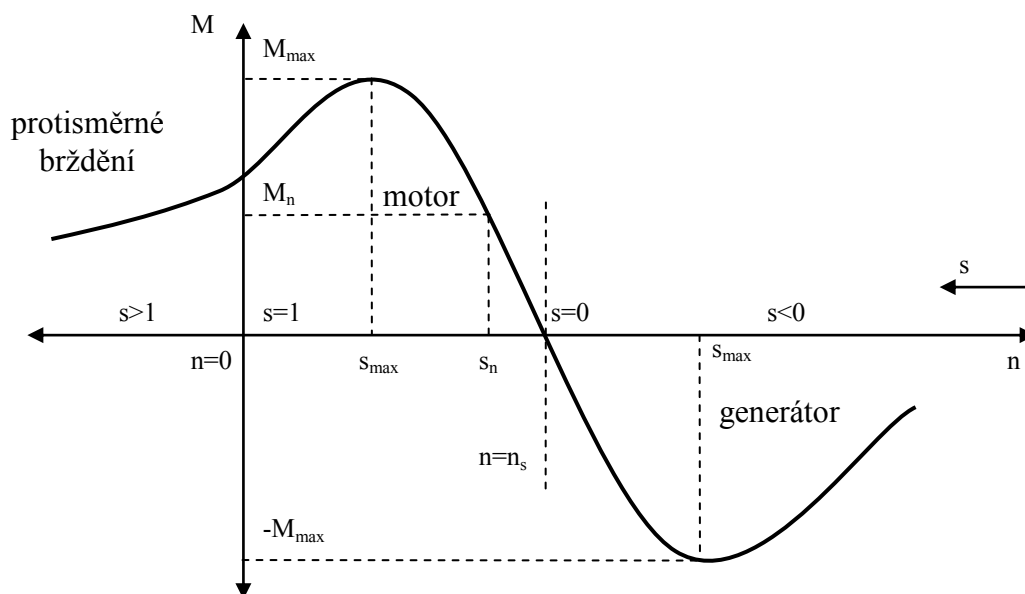
okamžitých hodnot), který má po obvodu vinutí. V konkrétním případě se nejčastěji jedná o trojfázovou soustavu, jejíž uspořádání os vinutí je po  $120^\circ$  elektrických. Proud procházející cívkami vytváří v prostoru mezi nimi magnetické pole, které se otáčí se stejnou frekvencí, jako má přivádějící střídavý proud, vzniká tak točivé magnetické pole. [2]



Obr. 3.2. Princip vzniku točivého magnetického pole

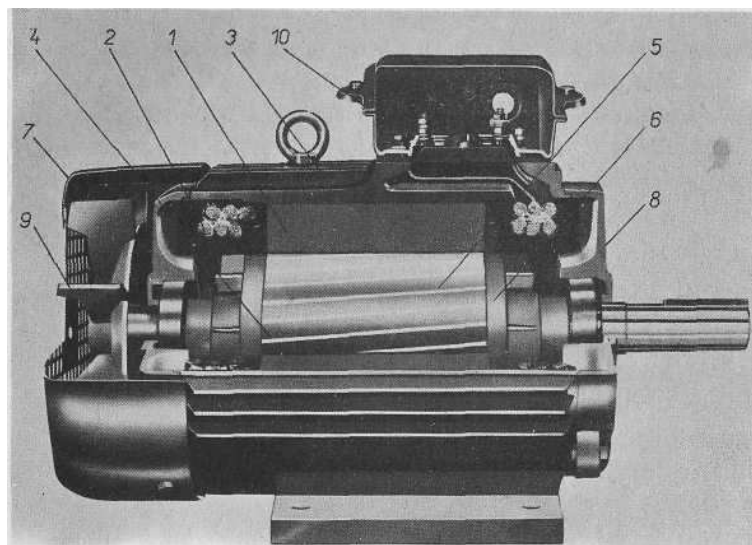
Vlastnosti těchto strojů lze popsat momentovou charakteristikou, která je uvedena na Obr. 3.3. Rozdělíme-li charakteristiku na 3 oblasti, dostaneme oblast, kdy  $s > 1$ , v této oblasti se stroj otáčí opačným směrem, než magnetické pole a proto tento režim nazýváme protisměrné brzdění. Při  $s = 1$  se stroj nachází ve stavu na krátko. Motorický režim nazýváme oblast, kdy  $s = (0 \text{ až } 1)$ , v případě  $s < 0$  se dostáváme do oblasti generátorického brzdění. Jmenovitému momentu  $M_n$  odpovídají jmenovité otáčky, a moment maximální nazýváme také tzv. *moment zvratu*  $M_{\max}$ , který lze vyjádřit vztahem (3.1). [2]

$$M_{\max} \cong \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{X_k} \quad (3.1)$$



Obr. 3.3. Momentová charakteristika AS

Konstrukce AS je vhodná pro sériovou výrobu. Celý magnetický obvod je složen z plechů, na rotoru se nachází klecové vinutí, které je vyrobeno jako klecový odlitek. Toto vinutí je umístěné v neizolovaných drážkách, jehož součástí bývají i rotorové ventilační lopatky.



Obr. 3.4. Řez trojfázovým motorem,

1 – statorový svazek, 2 – statorové vinutí, 3 – žebrovaná kostra, 4 – rotor s klecí,  
5 – tyče klece, 6 – kruhy klece, 7 – přední ložiskový štít, 8 – zadní ložiskový štít,  
9 – vnější ventilátor, 10 – statorová svorkovnice

### 3.1.1. Asynchronní motor 1LA7

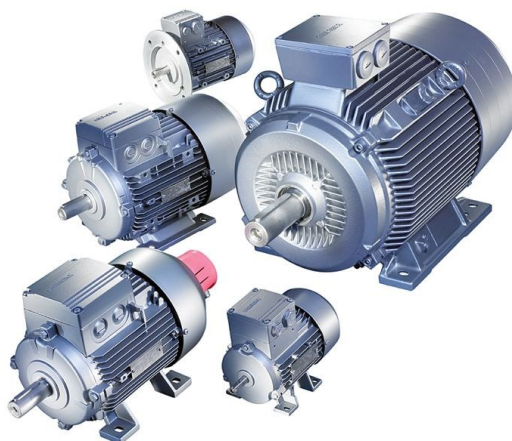
Pro pohánění pracovního mechanismu se využije trojfázový nízkonapětový asynchronní motor, s rotorem nakrátko, typové řady 1LA7. Tyto motory jsou díky své jednoduchosti nejužívanějšími motory, určené pro prostředí mírného klimatu k pohonu průmyslových zařízení (např. čerpadel, lisů, ventilátorů, apod.). [3]

Motor je v hliníkové kostře, s jedním válcovým koncem hřídele v patkovém nebo přírubovém provedení. Ventilátor je plastový s krytem z ocelového plechu. Statorové vinutí tvoří měděné vodiče a rotorová klec je tlakově odlita z hliníku. Svazek rotoru je nalisován na hřídel a uložen v kuličkových ložiskách s trvalou tukovou náplní. Volný konec hřídele motoru je opatřen vnitřním závitem. [3]

Jelikož se tyto motory řadí mezi nejužívanější, jsou od nich odvozeny modifikované řady a speciální provedení motorů.

Modifikované řady a speciální provedení motorů:

- *motory s cizím chlazením,*
- *motory bez vlastního ventilátoru řady IPP7,*
- *motory bez vlastního ventilátoru řady ILP7,*
- *motory vestavné IPK7,*
- *motory v litinové kostře 1LA6,*
- *motory v zajištěném provedení IMA7,*
- *motory se zvýšeným výkonem 1LA9,*
- *motory pro použití ve ztížených klimatických podmínkách,*
- *motory brzdové, zkratka G26,*
- *motory jednofázové 1LF7.*



Obr. 3.5. Typy motorů řady 1LA

U těchto motorů se udává výkon pro trvalé zatížení S1 dle ČSN EN 60 034-1 při kmitočtu 50Hz, teplotě okolí od -30°C do 40°C a montáži stroje v nadmořské výšce do 1000m. Motory jsou jištěny tepelnou ochranou proti přetížení (toto jištění je proudově závislé a zvláště účinné ve stavu na krátko). [3]

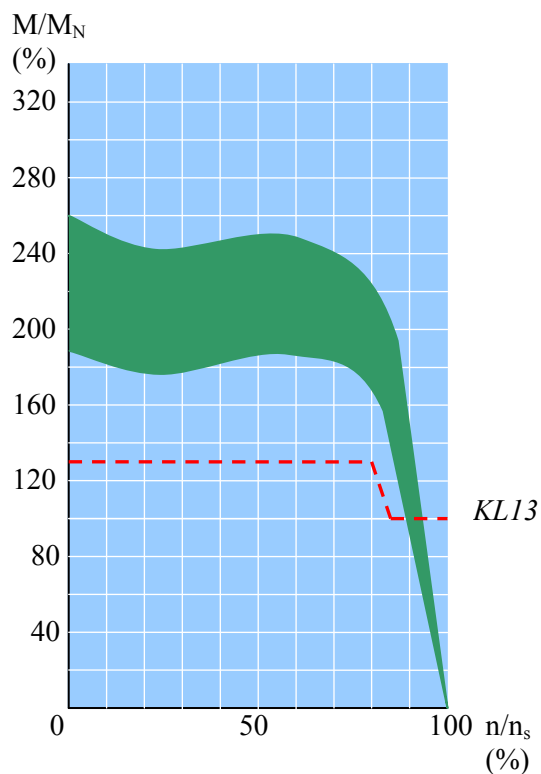
Všechny motory řady 1LA7 mohou být napájeny ze statických měničů kmitočtu, ale s napětím  $\leq 500\text{V}$ , abychom umožnili bezporuchový provoz. V našem případě použijeme konkrétní typ motoru 1LA7073-4AB10. [3]

### 3.1.2. Asynchronní motor 1LA7073-4AB10

Jmenovitý výkon	Osová výška	Jmenovité otáčky	Účinnost $\eta$	Účinník $\cos\varphi$	Jmenovitý proud	Jmenovitý moment	Záběrný moment $M_z/M_n$
kW	mm	ot/min	%		A	Nm	-
0,37	71	1500	65	0,8	1,03	2,5	1,9

Záběrný proud $I_k/I_n$	Moment zvratu $M_{\max}/M_n$	Moment setrvačnosti J	Hmotnost	Krytí	Třída oteplení	Počet pólů
-	-	$\text{kgm}^2$	kg	-	-	-
3,3		0,0008	6	IP55	B	4

Tab. 3.1. Technická data motoru typu 1LA7073-4AB10



Obr. 3.6. Momentová charakteristika konkrétního typu motoru (typický průběh)  
 $KL13$  – rozběh proti zátěžnému momentu až do  
 130% jmenovitého kroutícího momentu



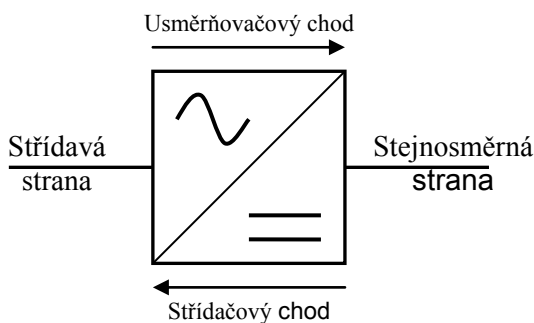
### 3.2. Měníč frekvence

Pro napájení motorů můžeme vybírat ze dvou druhů měničů, lze použít přímé měniče kmitočtu (cyklokonvertory), nebo nepřímé měniče kmitočtu. Cyklokonvertory slouží pro napájení synchronních motorů s budícím vinutím, kdežto nepřímé měniče slouží k napájení asynchronních motorů a synchronních motorů s permanentními magnety. Jelikož pohonná jednotka obsahuje asynchronní motor, je zřejmé, čím bude motor napájen.

Nepřímý měnič kmitočtu je tvořen usměrňovačem, střídačem a stejnosměrným meziobvodem. Usměrňovač usměrní střídavé napětí a proud o kmitočtu  $f_1$ , střídač usměrněné napětí roztrídí na požadovaný kmitočet  $f_2$ . Stejnosměrný meziobvod odděluje usměrňovač od střídače. Tím je umožněno řídit výstupní kmitočet  $f_2$  nezávisle na vstupním kmitočtu  $f_1$ .

#### 3.2.1. Usměrňovače

Usměrňovače jsou zařízení, které byly prvními aplikacemi výkonové elektroniky, sloužící k přeměně střídavé elektrické energie (střídavý proud) na energii stejnosměrnou (stejnosměrný proud). Ovšem v některých případech mohou pracovat i obráceně (střídačový chod).



Obr. 3.7. Symbolická značka usměrňovače

Usměrňovače můžeme rozdělit do několika skupin:

Podle způsobu komutace:

- s vnější komutací,
- s vlastní komutací.

Podle zapojení polovodičových spínačů:

- uzlové,
- můstkové.

Podle počtu fází:

- 1-fázové,
- 2-fázové,
- 3-fázové,
- $m$ -fázové.

Podle počtu pulsů výstupního napětí:

- 1-pulsní,
- 2-pulsní,
- 3-pulsní,
- $p$ -pulsní.

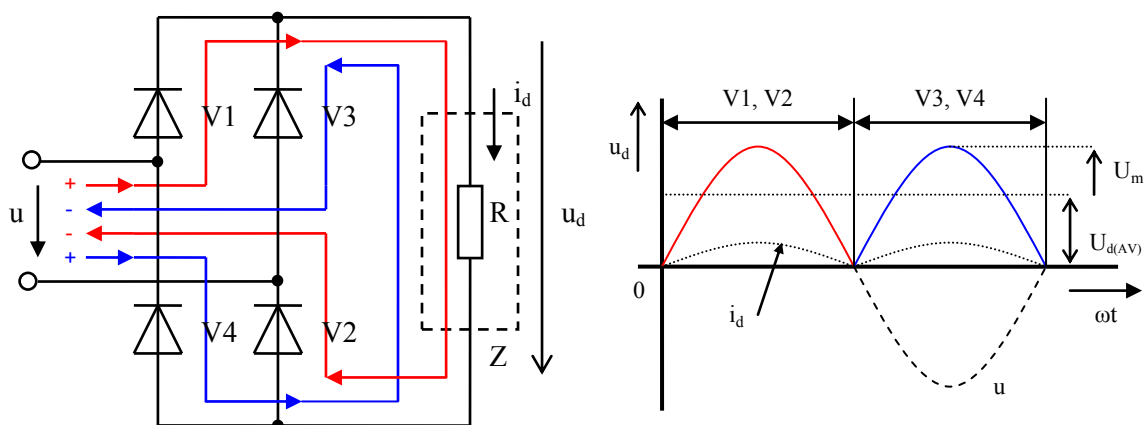
Podle řízení toku energie:

- řízené (tyristorové),
- neřízené (diodové),
- polorízené (smíšené).

Princip činnosti usměrňovače je zobrazen na Obr. 3.8. Jedná se o nejčastější zapojení jednofázového usměrňovače. Kladná část (červená) periody napájecího napětí  $u$  prochází přes polovodičové diody V1 a V2, záporná část (modrá) periody pak přes diody V3 a V4. Usměrněné napětí na zátěži  $u_d$  má pak charakter pulsů superponovaných na střední hodnotě usměrněného napětí  $U_{d(AV)}$ . Menší zvlnění výstupního napětí můžeme dosáhnout zvýšením počtu pulsů. [4]

Průběhy výstupního napětí jsou ovlivňovány charakterem zátěže. V tomto případě průběh napětí a proudu nám ukazuje chování usměrňovače v ustáleném stavu s uvažováním ideálních součástek. Střední hodnota výstupního napětí  $U_{d(AV)}$  lze vyjádřit vztahem:

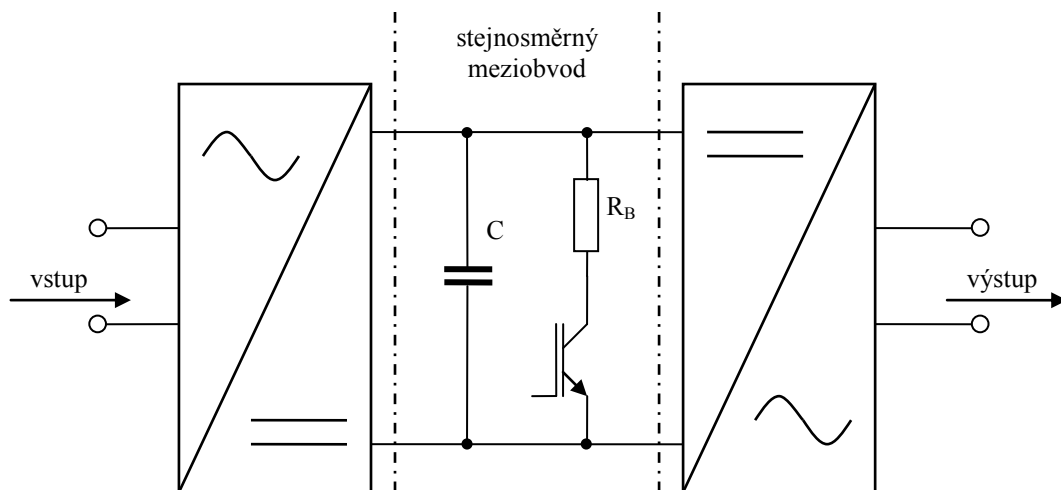
$$U_{d(AV)} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_m \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{U_m}{\pi} \cdot [-\cos(\omega t)]_0^\pi \cong 0,9U \quad (3.2)$$



Obr. 3.8. Princip jednofázového usměrňovače v můstkovém zapojení s průběhy usměrněného napětí a proudu při  $R$  zátěži

### 3.2.2. Stejnosměrný meziobvod

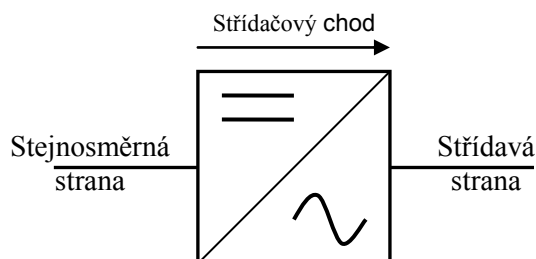
Úkolem stejnosměrného meziobvodu je napájet střídač, může být napětíový nebo proudový. V tomto případě je použit meziobvod napětíového typu, který tvoří vyhlazovací kondenzátor s poměrně velkou kapacitou. Tím pádem stejnosměrný obvod se chová vzhledem ke střídači jako zdroj napětí.



Obr. 3.9. Stejnoscerný meziobvod

Máme-li na vstupu diodový usměrňovač, řeší se problém generátorického brždění, čili výměna jalové energie mezi asynchronním strojem a kondenzátorem ve stejnoscerném obvodu přes střídač. Činnou energii přes diodový usměrňovač transportovat nejde, a proto se paralelně ke kondenzátoru připojuje odpor  $R_B$ , přes který se daná energie ztrácí. [2]

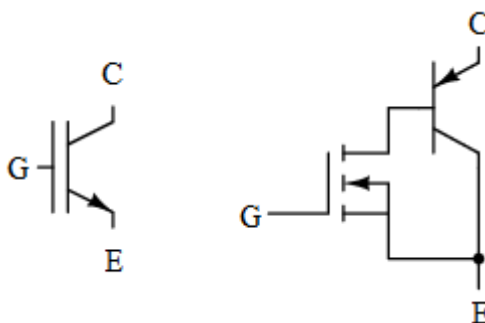
### 3.2.3. Střídače



Obr. 3.10. Symbolická značka usměrňovače

Střídač je určitý typ měniče, jehož úkolem je převážně přeměna stejnoscerného proudu na střídavý. Jelikož ale střídače dosáhly velkého rozšíření, nyní jsou využívány i k řízení okamžiku vypnutí. Dříve se ve střídačích používaly obyčejné tyristory, dnes jsou tyto součástky nahrazovány prvky GTO, IGCT, ale nejčastěji IGBT.

**IGBT tranzistory** (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) – jedná se v dnešní době o nejpoužívanější výkonové polovodičové součástky, které tvoří kaskádní spojení unipolárního a bipolárního tranzistoru (Obr. 3.11.). Unipolární tranzistor spíná proud báze koncového bipolárního tranzistoru. IGBT se vyznačují rychlým sepnutím. V dnešní době jsou vyráběny pro napětí do 6,5 kV, proudy do 2400A a spínací kmitočet do 20kHz. Sériové spojení je obtížné a proto je mnohdy integrováno až šest IGBT se zpětnými diodami do jednoho pouzdra (pro střídač). [2]



Obr. 3.11. IGBT

Střídače lze rozdělit do dvou základních skupin, a to *střídače napěťového typu* a *střídače proudového typu*. Na vstupu proudového střídače, napájeného proudovým zdrojem, se může měnit polarita napětí, ovšem polarita proudu zůstává stejná. U střídačů napěťového typu je tomu naopak. Na vstupu střídače, napájeného napěťovým zdrojem, se může měnit polarita proudu, ovšem polarita napětí zůstává stejná. Kmitočet  $f_2$  výstupního napětí a proudu je dán kmitočtem spínání výstupních spínacích součástek. [5]

Rozdělení:

Podle počtu fází:

- 1-fázové,
- 3-fázové.

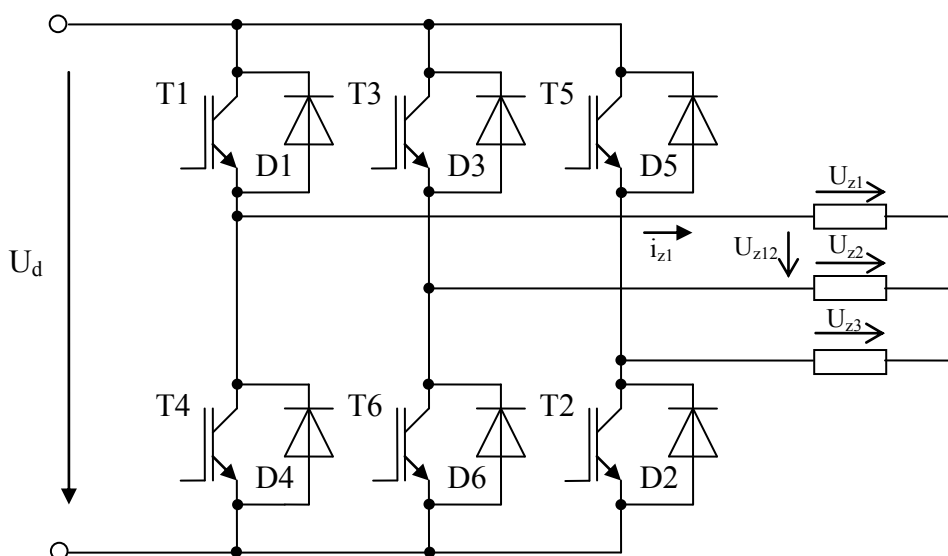
Podle zapojení:

- uzlové,
- můstkové,
- polomůstkové.

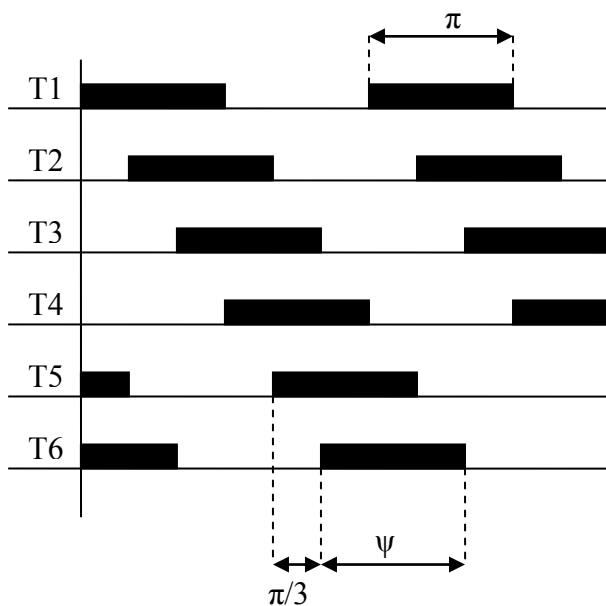
Podle způsobu komutace:

- s vnější komutací,
- s vlastní komutací.

Hovoříme-li o střídači s vnější komutací, znamená to, že střídač je vybaven tyristorovými součástkami, kdež to střídač s vlastní komutací využívá ke své činnosti vypínatelné součástky, nebo musí být vybaveny komutačními obvody. V dnešní době se ovšem vyrábějí téměř výhradně střídače napěťového typu.



Obr. 3.12. Schéma zapojení 3-fázového střídače (zátěž zapojená do hvězdy)



Obr. 3.13. Provozní rozsah úhlu sepnutí  $\psi$

střídačů lze úhel sepnutí řídit od  $\pi/3$  do  $\pi$ . Na výstupu střídače pak při spodní mezí  $\psi$  je napětí nulové a při maximální hodnotě napětí je  $\psi = \pi$  (s rostoucím  $\psi$  roste velikost napětí). [5]

Průběhy sdružených a fázových napětí na čisté činné zátěži pro několik vybraných hodnot  $\psi$ , jsou uvedeny na Obr. 3.14. Nesmí se zanedbat fakt, že při činné zátěži se zanedbávají zpětné diody. [5]

Spínání zpětných diod nastává při zátěži obsahující určitou indukčnost. Na Obr. 3.15. je vidět, že proud jedné fáze zátěže se před vypnutím uzavírá přes tranzistor T1 (po jeho vypnutí). Poté musí začít vést dioda D4 jejímž úkolem je doznívání proudu v původním smyslu (vypne-li spínač T4, vede dioda D1, vypne-li spínač T3, vede dioda D6, atd.). V době, kdy je sepnuta dioda

Trojfázový střídač je tvořen šesticí IGBT tranzistorů (T1 – T6), kde ke každému tranzistoru je paralelně připojena zpětná dioda (D1 – D6). Na Obr. 3.12. je zátěž zapojena do hvězdy, může ovšem být zapojena i do trojúhelníka. V obvodu střídače umožňují průchod kladného proudu vypínatelné součástky (v tomto případě IGBT) a průchod záporného proudu umožní zpětné diody.

Provozní rozsah úhlu sepnutí  $\psi$  lze vysvětlit díky Obr. 3.13., kde úhel sepnutí  $\psi$  je vyznačen černou barvou. Začátky intervalů sepnutí součástek jsou posunuty o  $\pi/3$ . Tuto velikost lze měnit s podmínkou, že všechny součástky musí mít stejnou velikost úhlu  $\psi$ . U třífázových

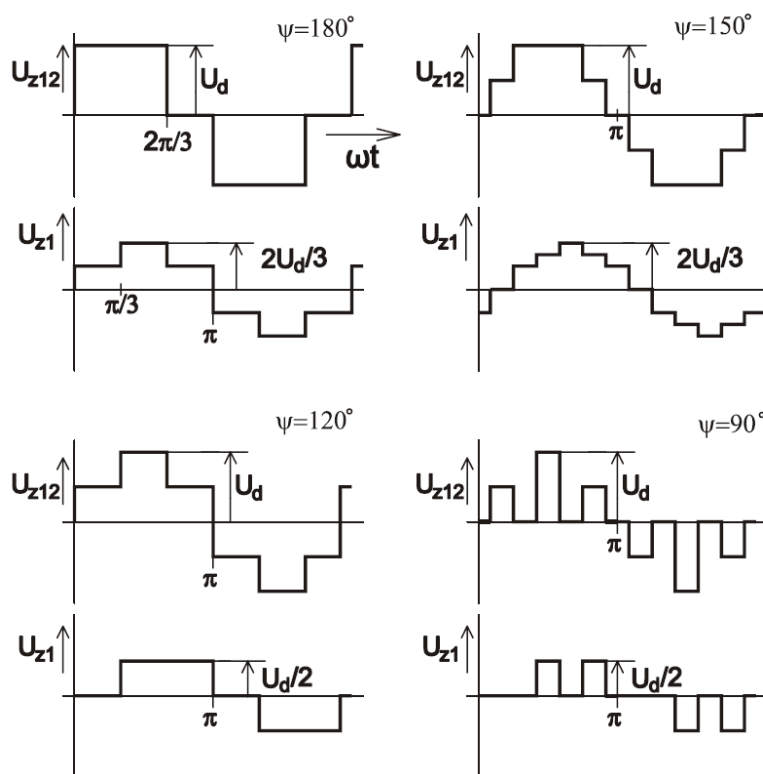
D4, udržuje dioda na antiparalelně připojeném spínači T4 závěrné napětí. Spínač T4 se sepne tehdy, dojde-li k poklesu proudu na diodě a tudíž i v příslušné fázi zátěže. Sepnutím spínače se pak uzavírá proud fáze zátěže v opačném smyslu. [5]

Při zátěži typu motor, může střídač pracovat ve střídačovém nebo v usměrňovačovém chodu (záleží na chodu motoru). Zátěž obsahuje indukčnost i harmonické napětí s kmitočtem rovným výstupnímu kmitočtu střídače.

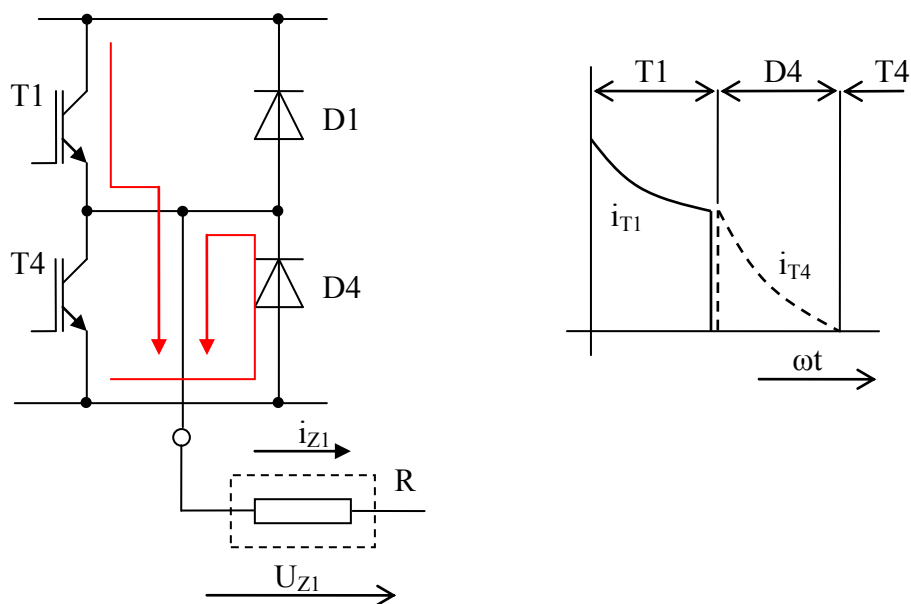
Řízení střídačů je vysvětleno v kapitole o nepřímém měniči kmitočtu.

Efektivní hodnota fázového napětí:

$$U_{z1} = \sqrt{\frac{1}{T} \int u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \left[ \int_0^{\frac{2}{3}\pi} \left( \frac{1}{3} U_d^2 \right) d\omega t + \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left( \frac{2}{3} U_d^2 \right) d\omega t \right]} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d \quad (3.3)$$



Obr. 3.14. Průběhy sdružených ( $U_{z12}$ ) a fázových ( $U_{z1}$ ) napětí na zátěži střídače při různých úhlech  $\psi$



Obr. 3.15. Spínání zpětných diod

### 3.3. Pracovní mechanismus

Pracovní mechanismus slouží pro přenos hnací síly od motoru na hřídele ozubených kol přípravku. Jedná se o dva řemeny a čtyři řemenice, z níž jeden řemen a dvě řemenice převádějí sílu od motoru na hnanou hřídel setrvačníku a druhý řemen s dvěmi řemenicemi zajišťuje přenos sil mezi samotnými hřídelemi. [9]

První přenos sil zajišťuje klínový řemen, kde přenos je zpřevodován dopomala v poměru 2:1 a to kvůli redukci velkého setrvačného momentu setrvačníku. Jde o klínový řemen PHG Z28.5 klasického průřezu, který je přilnut k řemenicím PHP 1SPZ50TB a PHP 1SPZ100TB. Některé z hlavních parametrů navrhnutého převodu jsou uvedeny v Tab. 3.2. [9]

Přenos sil mezi samotnými hřídelemi je realizován synchronním ozubeným řemenem, který zajistí konstantní převodový poměr v poměru 2:1. Tudiž dvě otáčky klikového hřídele odpovídají jedné otáčce váčkového hřídele. Řemen PHG 345-L-100 je přilnut k řemenicím PHP 18L100TB a PHP 36L100TB. Některé z hlavních parametrů navrhnutého převodu jsou uvedeny v Tab. 3.3. [9]

Průměr řemenice PHP 1SPZ50TB	50 mm
Průměr řemenice PHP 1SPZ100TB	100 mm
Osová vzdálenost	250,94 mm
Délka řemene	740 mm
Koeficient prokluzu řemene	1,216%
Rychlost řemene při 2000 ot/min	5,35 m/s
Přenositelný výkon řemene	0,58 kW

Tab. 3.2. Parametry navrhnutého převodu

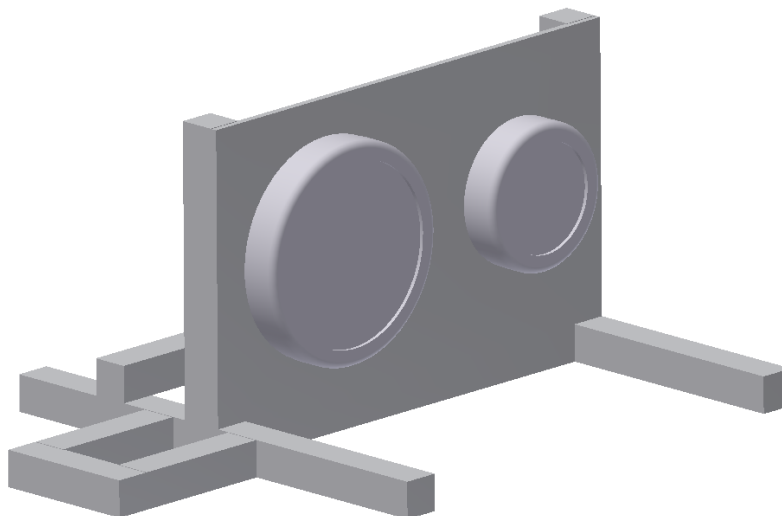
Roztečný průměr řemenice PHP 18L100TB	54,57 mm
Roztečný průměr řemenice PHP 36L100TB	109,15 mm
Osová vzdálenost	308,36 mm
Počet zubů řemene	92
Rychlost řemene při 2000 ot/min	5,35 m/s
Přenositelný výkon řemene	1,35 kW

Tab. 3.3. Parametry navrhnutého převodu

### 3.4. Laboratorní pracoviště

Hlavními částmi stanoviště jsou ozubená kola umístěná na hřídelích a hliníková konstrukce, ke které jsou hřídele připevněny. Model je doplněn na přední straně deskou, která tvoří čelní panel, na který se umístí snímače.

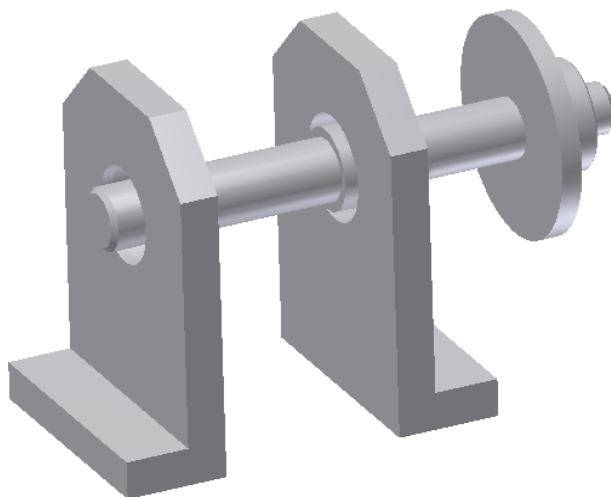
Hlavní rám, neboli hliníková konstrukce je navržena tak, aby jednotlivé části konstrukce bylo možné dobře a pevně k sobě sešroubovat. Jelikož při navrhování byl kladen důraz na stabilitu, aby nedocházelo k případným vibracím od rotujícího setrvačnicku, obsahuje rám poměrně velkou podstavu s možností pevného připevnění ke stolu, či jiné konstrukci. Na rám se postupně připevní sestava hřídele pro setrvačnick, sestava hřídele pro řemenici váčky, ale taky asynchronní motor a čelní panel. [9]



Obr. 3.16. Rám

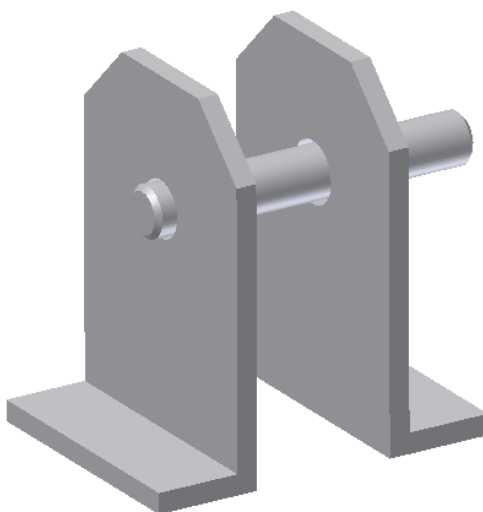
Sestavu hřídele pro setrvačnick lze vidět níže na Obr. 3.17. Hřídel je uložen ve dvou ložiskách a pevně uchycena díky pevnému uložení vnitřních kroužků radiálních ložisek. Celou hřídel drží dvě podpory pevně připevněné k rámu. Mezi tyto podpory na hřídeli je umístěná klínová řemenice, která pohání celý mechanismus a ozubená řemenice, která přes synchronní řemen spojuje druhou hřídel. Na hřídeli je umístěn i náboj, který připevňuje setrvačnick s hřídelí. [9]





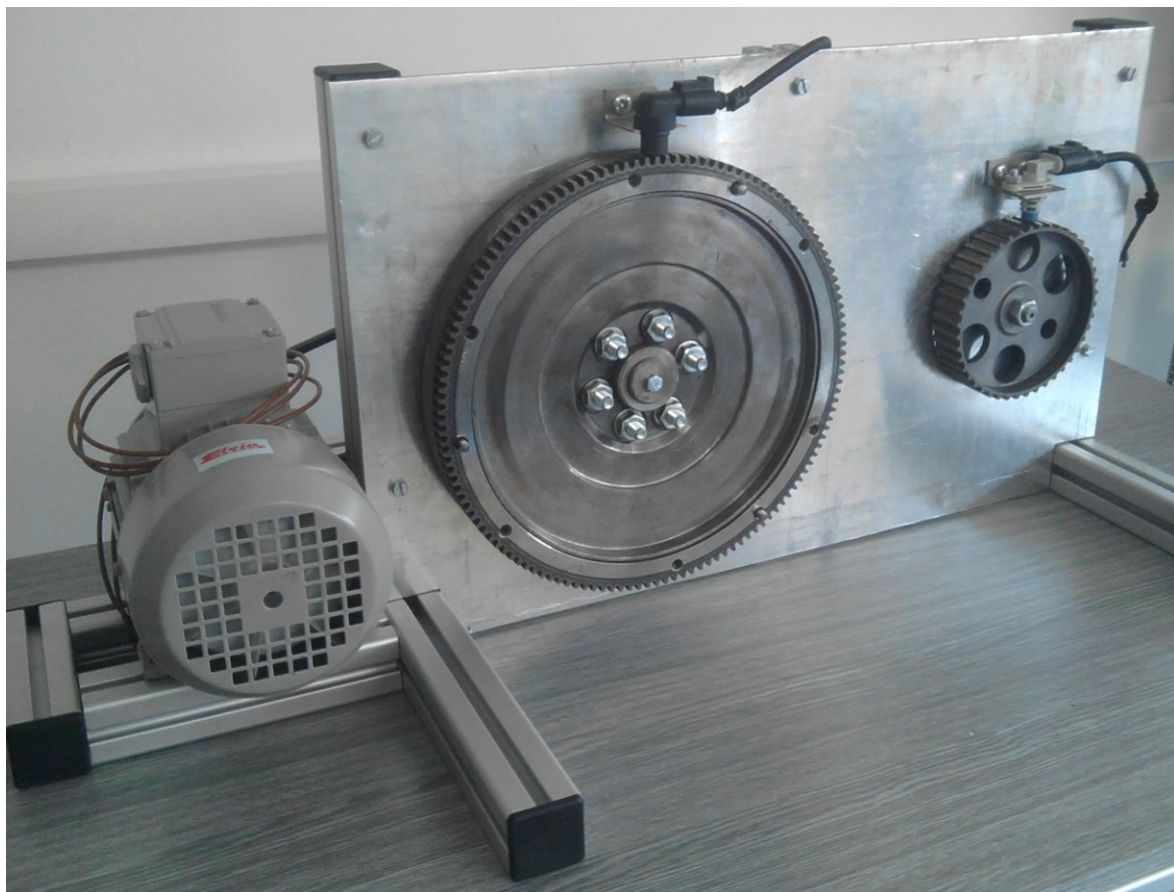
*Obr. 3.17. Hřídel pro setrvačnick*

Uložení hřídele pro řemenici váčky je na stejném principu, jako tomu bylo u sestavy hřídele pro setrvačnick. Dvě podpory, držící hřídel, na které budou také měřeny otáčky. Hřídel je poháněná z hřídele setrvačnicku pomocí synchronního řemene a ozubené řemenice. [9]

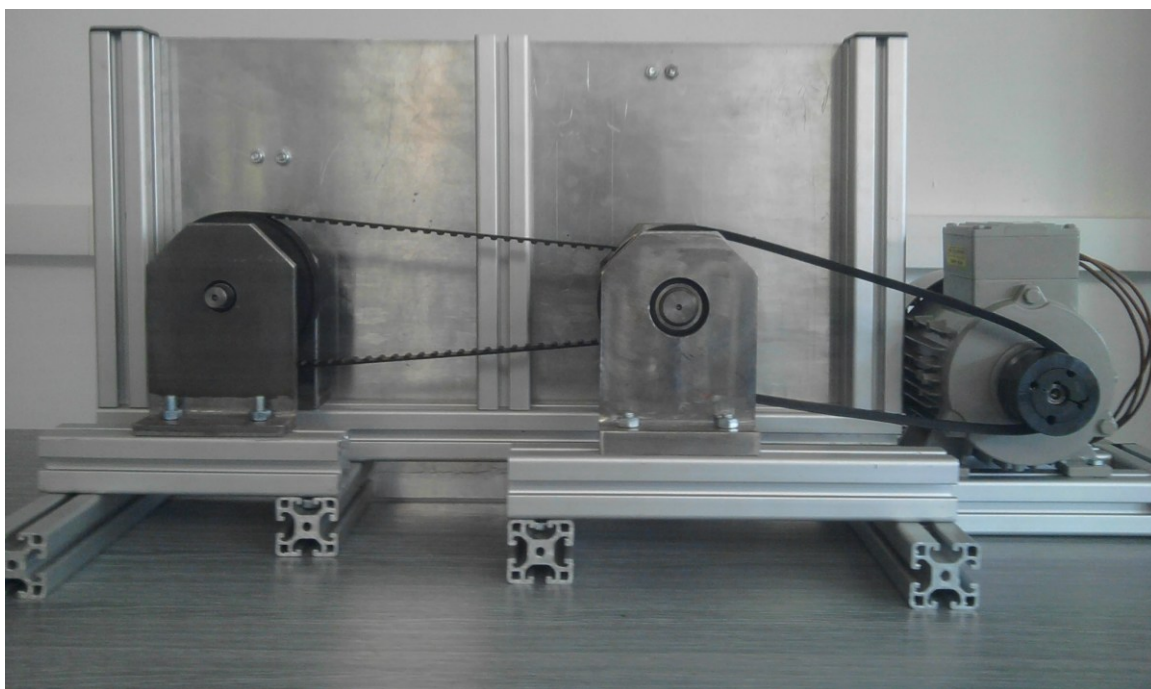


*Obr. 3.18. Hřídel pro řemenici*

Hlavní panel slouží k zakrytí hnacích částí mechanismu (řemeny, hřídele, řemenice) a uchycení snímačů pomocí úchytů. Panel tloušťky 4mm je umístěn za ozubenými koly a přichycen k hliníkové konstrukci. [9]



*Obr. 3.19. Přední část*



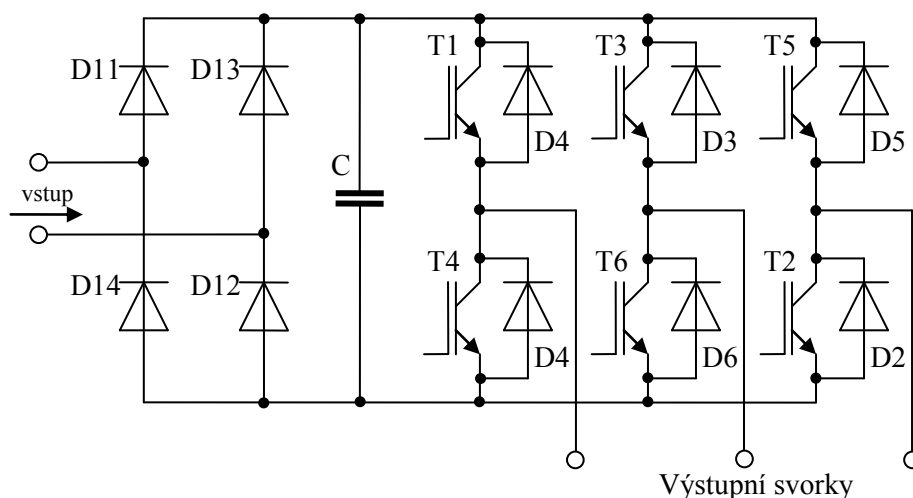
*Obr. 3.20. Zadní část*

## 4. Nepřímý měnič kmitočtu

Jak už bylo dříve zmíněno, nepřímý měnič frekvence s napěťovým meziobvodem je tvořen neřízeným usměrňovačem, vyhlazovacím filtrem a střídačem napětí v můstkovém zapojení, jak je tomu na Obr. 4.1.

Hlavní důvody použití nepřímého měniče frekvence:

- *značný rozsah regulace otáček motoru při konstantním momentu,*
- *úspora elektrické energie (bezztrátová regulace) v celém otáčkovém rozsahu,*
- *snížení hlučnosti.*



Obr. 4.1. Nepřímý měnič kmitočtu

Jelikož popis jednotlivých částí byl uveden v předchozí kapitole, tato kapitola se zabývá řízením efektivní hodnoty výstupního napětí. Pro změnu výstupního napětí se využívá šířkově-pulsní modulace střídače (PWM – Pulse Width Modulation), jejíž princip spočívá ve spínání výkonových prvků střídače tak, aby střední hodnota měla sinusový průběh.

Způsoby řízení efektivní hodnoty výstupního napětí:

- *komparační PWM modulace,*
- *vektorová PWM modulace.*

Obě tyto metody se využívají pro řízení asynchronního motoru.

### 4.1. Komparační PWM modulace

Princip této modulace spočívá v porovnání tří referenčních napětí sinusového průběhu  $u_{refa}$ ,  $u_{refb}$ ,  $u_{refc}$  o určité frekvenci  $f_{ref}$  se signálem trojúhelníkového průběhu s amplitudou  $U_T$  a frekvenci  $f_T$ . Dojde-li k tomu, že úroveň sinusového a trojúhelníkového signálu dosáhnou stejné hodnoty,

generuje se impuls pro sepnutí spínače (horního nebo spodního) v příslušné větvi střídače. Změnou amplitudy referenčních sinusových napětí  $U_{Mref}$ , které jsou vzájemně posunuty o  $120^\circ$ , se řídí velikost výstupního napětí a změnou frekvence  $f_{ref}$  se řídí výstupní frekvence základní harmonické. Spínací frekvence výkonových spínačů  $f_s$  je pak určena frekvencí  $f_T$ . [6]

Referenční napětí:

$$u(t)_{refa,b,c} = U_{Mref} \cdot \sin(\omega_{ref}t - 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ) \quad (4.1)$$

Modulační frekvenční poměr:

$$n_p = \frac{f_s}{f_{ref}} \quad (4.2)$$

Jedná se o poměr mezi spínací frekvencí a frekvencí referenčního napětí.

Modulační poměr:

$$m = \frac{U_{Mref}}{U_T} \quad (4.3)$$

Modulační poměr, respektive hloubka modulace, je poměr mezi maximální hodnotou referenčního signálu  $U_{Mref}$  a hodnotou trojúhelníkového signálu  $U_T$ , a může nabývat hodnot 0 až 1. Střední hodnota napětí se postupně mění (během spínacího intervalu výkonového spínače) a má sinusový průběh s amplitudou základní harmonické  $U_{(1)}$  [6]:

$$U_{(1)} = \frac{mU_d}{2} \quad (4.4)$$

kde  $U_d$  je napětí v meziobvodu.

Tento způsob modulace se nazývá PWM s přirozeným vzorkováním a používá se pro analogové verze, jelikož v mikroprocesorových modulátorech se používá pravidelné vzorkování, neboť parametry pulsu lze stanovit analyticky. [6]

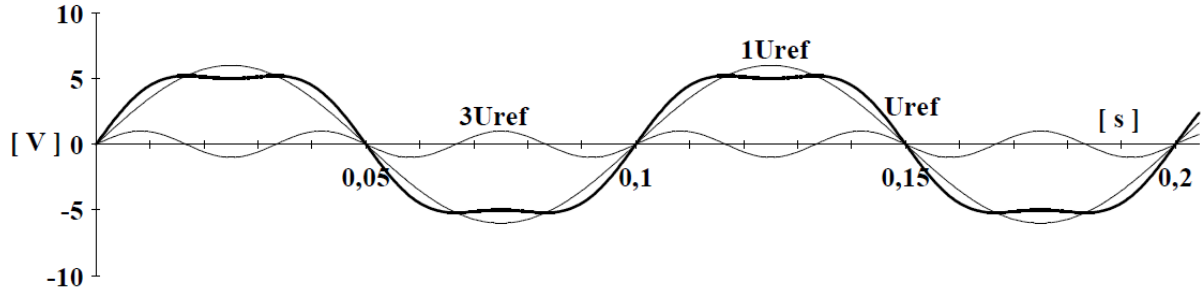
#### 4.1.1. Komparační PWM modulace s přidáním třetí harmonické

Princip je úplně stejný jako u komparační PWM modulace. Ovšem pro lepší využití se k základní harmonické s frekvencí  $f_{ref}$  přidá třetí harmonická s frekvencí  $3f_{ref}$ . Referenční napětí je pak rovno:

$$u(t)_{ref,a,b,c} = U_{Mref} \cdot [\sin(\omega_{ref}t - 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ) + a \cdot \sin(3\omega_{ref}t)] \quad (4.5)$$

$a$  – poměr třetí harmonické a základní harmonické třetího napětí

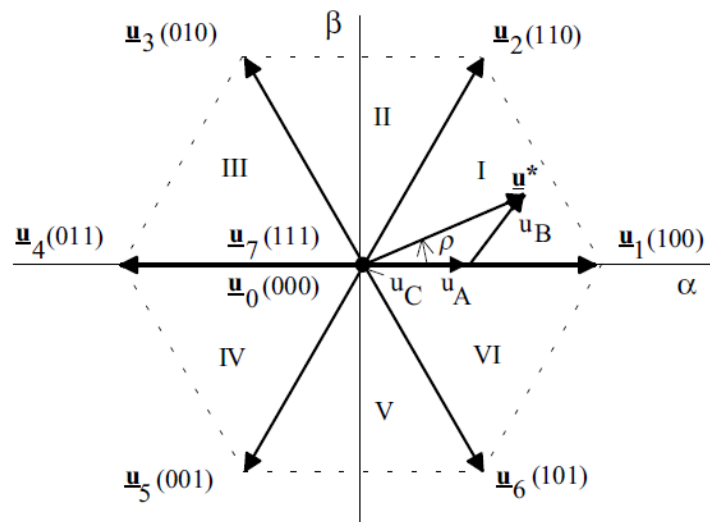
Tato metoda umožňuje asi o 15% lepší využití meziobvodu, než tomu bylo u komparační sinusové PWM modulace a neobsahuje tolik vyšších harmonických proudů. [6]



Obr. 4.2. Referenční napětí s přidáním třetí harmonické [6]

#### 4.2. Vektorová PWM modulace

Vektorová modulace je založena na aproximaci otáčejícího žádaného vektoru napětí  $u^*$ . Řízení spočívá v realizaci vypočtené polohy a velikosti prostorového vektoru statorového napětí. Existuje osm základních poloh vektoru napětí ( $u_0$  až  $u_7$ ), pro napěťový střídač s šesti spínacími prvky, realizovaných příslušnou kombinací sepnutých a vypnutých spínačů (viz. Obr. 4.3.). Z polohy vektoru se určí příslušná kombinace sepnutých a vypnutých spínačů, velikost vektoru je pak realizována vypočtenou dobou sepnutí. [6]



Obr. 4.3. Vektory napětí [6]

Z Obr. 4.3. je zřejmé, že oblast, v níž se vektor pohybuje, je rozdělena do 6 sektorů. V každém vektoru se využívají nulové a přilehlé vektory daného sektoru.

Obecné vztahy pro libovolné sektory:

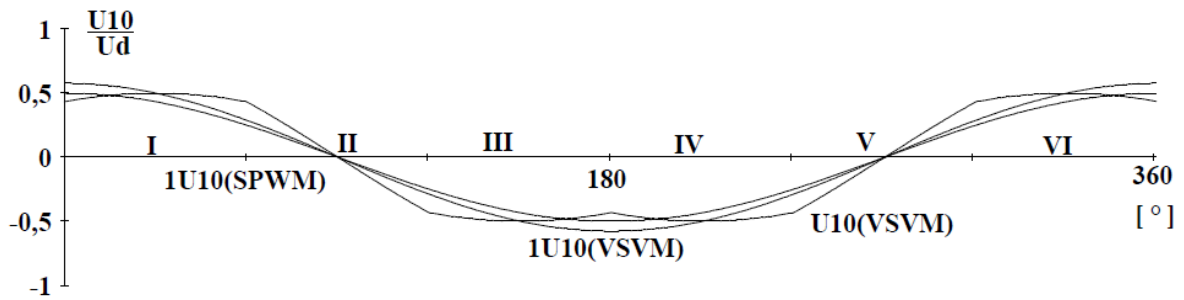
$$\underline{u}^* = \frac{u_k T_k}{T_s} + \frac{u_{k+1} T_{k+1}}{T_s} + \frac{u_{0(7)} T_0}{T_s} \quad (4.6)$$

$$T_k = \sqrt{3} \frac{|\underline{u}^*|}{U_d} T_s \sin(60^\circ - \rho) \quad (4.7)$$

$$T_{k+1} = \sqrt{3} \frac{|\underline{u}^*|}{U_d} T_s \sin \rho \quad (4.8)$$

$$T_0 = T_s - T_k - T_{k+1} \quad (4.9)$$

kde:  $T_s$  vzorkovací doba  
 $T_k$  doba sepnutí vektoru  
 $T_{k+1}$  doba sepnutí vektoru  
 $T_0$  doba sepnutí vektoru  $\underline{u}_0$  nebo  $\underline{u}_7$   
 $\sqrt{3} \frac{|\underline{u}^*|}{U_d}$  hloubka modulace  $m$ , s maximální hodnotou rovna jedné



Obr. 4.4. Porovnání komparační sinusové PWM modulace (SPWM) a vektorové PWM (VSVM) [6]

Popsat nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem matematickým popisem je jednodušší, bude-li napětí v meziobvodu konstantní (velká kapacita kondenzátoru).

Výstupní napětí jedné fáze měniče:

$$u_{1a} = K_M u_{sa}(t - T_M) \quad (4.10)$$

$$K_M = k_s \frac{U_d}{u_{s \max}} \quad (4.11)$$

$$k_s = \frac{1}{2} \quad \text{komparační PWM modulace} \quad (4.12)$$

$$k_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{vektorová PWM modulace} \quad (4.13)$$

kde:	$K_M$	zesílení měniče frekvence
	$T_M$	doba zpoždění měniče
	$k_s$	činitel řízení měniče frekvence
	$U_d$	napětí meziobvodu
	$u_{smax}$	maximální řídicí napětí

## 5. Návrh a realizace nepřímého měniče kmitočtu

Kapitola popisuje jednotlivé části měniče, schéma zapojení a desky plošných spojů. Měnič lze rozdělit na výkonovou část, která obsahuje usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a střídač a řídicí část, sloužící k řízení střídače.

Zásady při návrhu:

- *Plochy všech proudových smyček musí být co nejmenší.*
- *Síťové svorky, vypínače, pojistky, atd. by měly být blízko sebe.*
- *Kresba plošného spoje by měla být navržena tak, aby smyčky byly co nejmenší, jelikož proud za usměrňovačem je impulsní povahy s daleko vyšší amplitudou, než je stejnosměrná složka.*
- *Při návrhu plošného spoje je třeba dodržovat izolační mezery.*
- *Plošné spoje je třeba navrhnout tak, aby vodiče měly co nejmenší délku a co nejméně smyček.*
- *Velké vodivé plochy.*
- *Všechny součástky musí mít mezi sebou dostatečnou vzdálenost.*
- *Je vhodné dodržovat vhodnou polarizaci součástek.*

## 5.1. Výkonová část

### 5.1.1. Usměrňovač

Motor je napájen přes měnič ze sítě 230V, tudíž na vstupu bude jednofázový usměrňovač v můstkovém zapojení, jehož princip je popsán v kapitole 3.2.1. Jako diody byly zvoleny diody BY550 s jmenovitým proudem 5A se špičkovým závěrným napětím 600V.

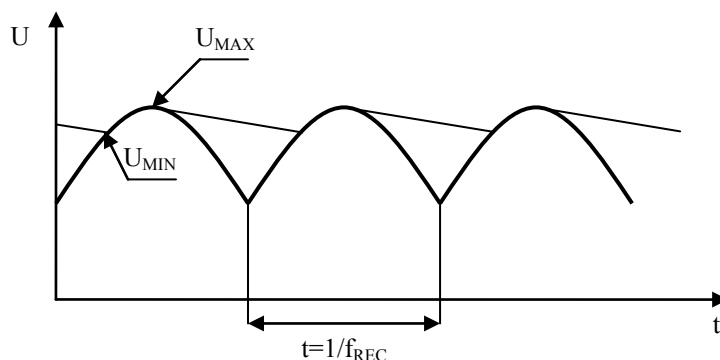
### 5.1.2. Stejnoseměrný mezipřevod

Za usměrňovačem se nachází stejnosměrný mezipřevod, jehož úkolem je napájet střídač. Ovšem často se elektrolytické kondenzátory používají k vyhlazení napětí za usměrňovačem. Potřebná kapacita pro vyhlazení zvláště napájecího napětí se určí dle vzorce:

$$C_{MIN} = \frac{2P}{(U_{MAX}^2 - U_{MIN}^2)f_{REC}} \quad (5.1)$$

Pro výpočet kapacity je třeba znát hodnoty  $U_{MAX}$ ,  $U_{MIN}$  a  $f_{REC}$ .

Zvolený rozkmit napětí = +/-10%



Obr. 5.1. Průběh napětí za usměrňovačem

Výpočet vlastního kmitočtu usměrňovače:

$$f_{REC} = p \cdot f = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

$p$  – počet pulsů

Výpočet maximálního napětí:

$$U_{MAX} = U_0 + (10\%U_0) = 207 + 20,7 = 227,7 \text{ V} \quad (5.3)$$

$$U_0 = 0,9U = 0,9 \cdot 230 = 207 \text{ V} \quad (5.4)$$

$U_0$  – střední hodnota výstupního napětí usměrňovače



Výpočet minimálního napětí:

$$U_{MIN} = U_0 - (10\%U_0) = 207 - 20,7 = 186,3V \quad (5.5)$$

Výpočet kapacity:

$$C_{MIN} = \frac{2P}{(U_{MAX}^2 - U_{MIN}^2)f_{REC}} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^3}{(227,7^2 - 186,3^2) \cdot 100} = \underline{\underline{583,4\mu F}} \quad (5.6)$$

Je vhodné použít paralelní spojení dvou kondenzátoru K05 330μF/450V. Poté dosáhneme výsledné kapacity C.

$$C = C_1 + C_2 = 330 + 330 = \underline{\underline{660\mu F}} \quad (5.7)$$

Lze využít i vzorce pro výpočty jiných hodnot, např.:

Výpočet nabíjecí doby:

$$t_C = \frac{\arccos\left(\frac{U_{MIN}}{U_{MAX}}\right)}{2\pi f} \quad (5.8)$$

Výpočet vybíjecí doby:

$$t_{DC} = \frac{1}{f_{REC}} - t_C \quad (5.9)$$

Špičkový nabíjecí proud:

$$I_{Cpeak} = C \frac{dU}{dt_C} = C \frac{(U_{MAX} - U_{MIN})}{dt_C} \quad (5.10)$$

Špičkový vybíjecí proud:

$$I_{DCpeak} = C \frac{dU}{dt_{DC}} = C \frac{(U_{MAX} - U_{MIN})}{dt_{DC}} \quad (5.11)$$

Efektivní nabíjecí proud:

$$I_{CRMS} = \sqrt{I_{Cpeak}^2 t_C f_{REC}} \quad (5.12)$$

Efektivní vybíjecí proud:

$$I_{DCRMS} = \sqrt{I_{DCpeak}^2 t_{DC} f_{REC}} \quad (5.13)$$

### 5.1.3. Střídač

V dnešní době, jsou pojmy "energeticky-úsporný" a "tichý běh" ve světě regulace otáček motorů stále více důležité. Jsou kladeny požadavky na kompaktnost, vestavěné řízení, celkové nižší náklady a optimalizace celkového poměru ceny a výkonu celého pohonu.

S cílem splnit tyto potřeby, firma Fairchild vyvinula novou řadu kompaktních, vysoce funkčních, a vysoce účinných výkonových polovodičových zařízení nazvaných "DIP-SPM (Dual In Line - Smart Power Module)". DIP-SPM spojuje optimální ochranu obvodů a řízení odpovídající spínacím charakteristikám IGBT. Spolehlivost systému je dále zvýšena díky integrované funkci ochrany pod napětím a ochraně proti zkratu. Cílem návrhu DIP-SIM je vytvořit modul s nízkou spotřebou s vyšší spolehlivostí. [7]



Obr. 5.2. Pouzdro střídače (DIP-SPM)

Vlastnosti DIP-SIM:

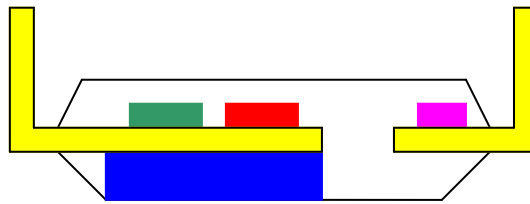
- 600V/10 až 75 A v jednotném pouzdře.
- Vysoká spolehlivost díky plně testované koordinaci HVIC a IGBT.
- Třífázový IGBT střídač, včetně kontrolních IC pro řízení „GATEU“ a ochranu
  - High-side funkce: ochrana řídicího obvodu pod napětím (bez výstupního poruchového signálu).
  - Low-side funkce: ochrana pod napětím a před zkratem prostřednictvím externího odporového bočníku (s poruchovým signálem).
- Uzemněné napájení.
- Izolační napětí 2500Vrms po dobu jedné minuty.
- Velmi nízký svodový proud kvůli keramickému substrátu.
- Nízko ztrátové, efektivní IGBT tranzistory a FRD diody, optimalizované pro využití při řízení motorů.
- Kompaktní a levné pouzdro, umožňující miniaturizaci návrhu měniče.
- Spínací charakteristiky IGBT odpovídající systémovým požadavkům.
- Nízký svodový proud a vysoké izolační napětí.

Integrované funkce:

- High-side IGBT tranzistorů měniče:
  - obvod pro ovládání „GATEU“ tranzistorů,
  - izolované vysokonapětové vysokorychlostní přepínání,
  - ochrana řízení napájení před podpětím.

- *Low-side IGBT tranzistorů měniče:*
  - obvod pro ovládání „GATEU“ tranzistorů,
  - ochrana před zkratem,
  - ochrana řízení napájecího obvodu před podpětím.
- *Signalizace poruchy (VFO) : Pro poruchy jako zkrat (low-side IGBT) a podpětí.*
- *Vstupní rozhraní – 3,3 V, kompatibilní s CMOS/TTL 5V, vstup pro Schmittův klopný obvod s několika pasivními součástkami pro jeho nastavení.*

DIP-SPM obsahuje třífázový střídač tvořený šesti IGBT, šesti rychlými diodami (FRD) a čtyř IC pro kontrolní funkce. Byl navržen tak, aby měl pouze minimální nezbytné funkce potřebné pro řízení nízko výkonových měničů. Na Obr. 5.3. lze vidět jak je struktura hlavního rámu připevněna tak, aby zabezpečila elektrickou vzdálenost. Ve všech částech, kde se vyskytuje vysoké napětí, jsou zajištěny bezpečné vzdálenosti 3mm u povrchu a 4mm u mezer. Proto lze v rozsahu s nízkou spotřebou pokrýt téměř celý rozsah mezi 0,5 a 4 kW v návrhu jednoduchého výkonového obvodu využívajícího DIP-SPM. [7]



Obr. 5.3. Vnitřní struktura DIP – SPM pouzdra, vyplněné pryskyřicí  
FRD diody, IGBT, odvod tepla, kontrolní IC

Datasheet střídače obsahuje tabulku, v níž jsou popsány jednotlivé vstupní a výstupní piny.

Popis jednotlivých funkcí pinů:

$$V_{B(U)} - V_{S(U)}, V_{B(V)} - V_{S(V)}, V_{B(W)} - V_{S(W)}$$

- *piny pro napájení řízení,*
- *není potřeba žádného externího napájení pro IGBT.*

$$V_{CC(L)}, V_{CC(UH)}, V_{CC(VH)}, V_{CC(WH)}$$

- *jedná se o kontrolní piny napájení vestavěných IC.*

$$com_{(H)}, com_{(L)}$$

- *společný uzemňovací pin,*
- *společný pin pro DIP-SPM je připojen k zemi.*

$IN_{(UL)}, IN_{(VL)}, IN_{(WL)}, IN_{(UH)}, IN_{(VH)}, IN_{(WH)}$

- *piny pro vstupní signál,*
- *jedná se o piny pro řízení vestavěných IGBT,*
- *IGBT připojený k odpovídajícímu pinu je převeden do stavu ON pokud je na odpovídající pin přivedené dostatečné „logické“ napětí,*
- *jsou aktivovány napětím vstupních signálů.*

$C_{SC}$

- *piny pro ochranu/detekci zkratového proudu.*

$R_{SC}$

- *je zapotřebí vložit mezi tento pin a uzemnění signálu rezistor pro dělení napětí ( $R_{SC}$ ).*

FO

- *jedná se o výstupní pin, určený k oznámení chyby,*
- *VFO výstup je konfigurován s otevřeným kolektorem.*

$C_{FOD}$

- *jedná se o pin určený pro výběr délky poruchového signálu,*
- *délka chybového pulzu  $t_{FOD}$  závisí na kapacitě kondenzátoru  $C_{FOD}$ .*

P

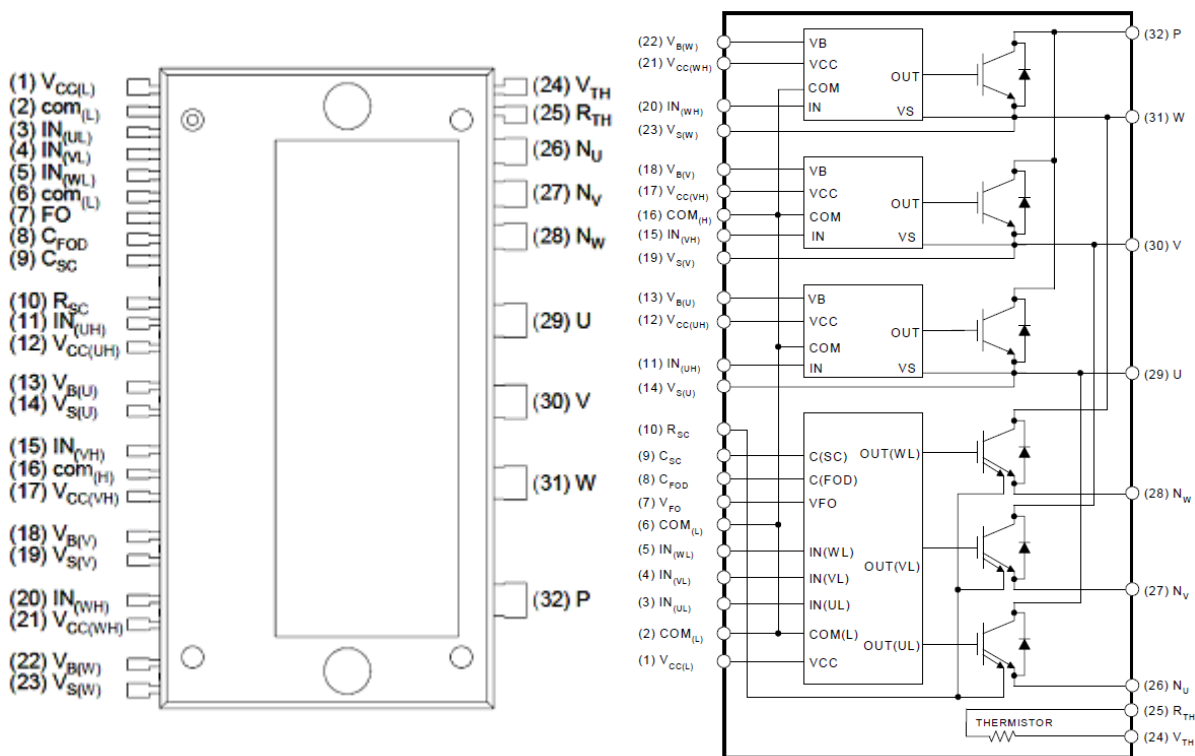
- *jedná se o pin pro připojení kladného stejnosměrného napětí pro napájení měniče.*

$N_U, N_V, N_W$

- *jedná se o napájecí piny záporného napětí (zem) měniče.*

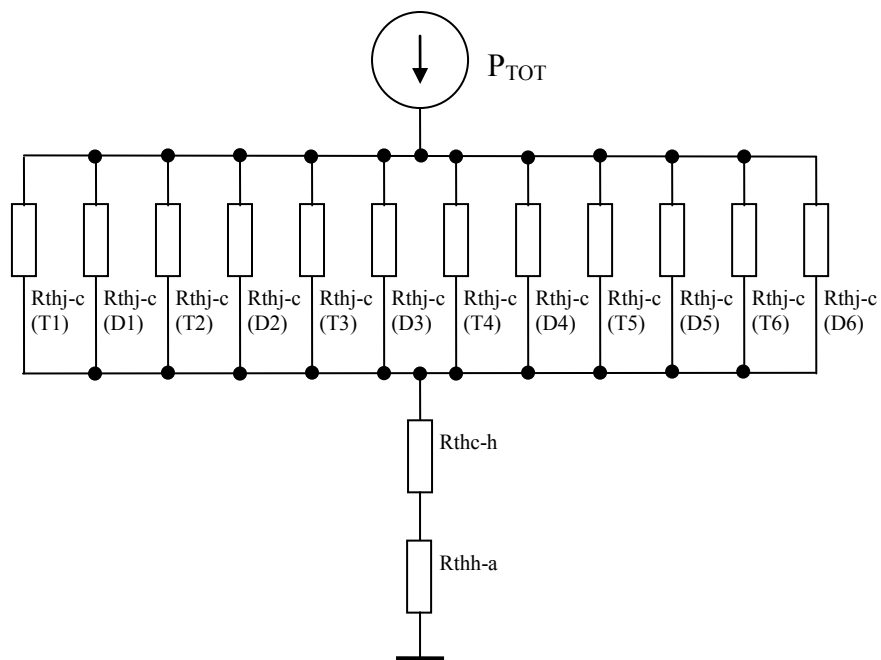
U, V, W

- *piny pro připojení zátěže (např. Motoru).*



Obr. 5.4. Popis pinů a vnitřní struktura střídače

#### 5.1.4. Návrh chladiče



Obr. 5.5. Tepelné schéma 3-fázového střídače

### Návrh chladiče:

Ztrátový výkon:

$$P_{TOT} = 43W$$

Výpočet  $R_{th\ j-c(d+t)}$  diody a tranzistoru:

$$R_{th\ j-c(d+t)} = \frac{R_{th\ j-c(dioda)} \cdot R_{th\ j-c(tran.)}}{R_{th\ j-c(dioda)} + R_{th\ j-c(tran.)}} = \frac{3,6 \cdot 2,9}{3,6 + 2,9} = 1,606K / W \quad (5.13)$$

Výpočet  $R_{th\ j-c(celkový)}$ :

$$R_{th\ j-c(celkový)} = \frac{R_{th\ j-c(d+t)}}{6} + R_{th\ c-h} = \frac{1,606}{6} + 0,06 = 0,328K / W \quad (5.14)$$

Výpočet  $R_{th\ h-a}$ :

$$R_{th\ h-a} = \frac{T_j - T_a}{P_{TOT}} - R_{th\ j-c(celkový)} = \frac{125 - 40}{43} - 0,328 = 1,648K / W \quad (5.15)$$

Volba chladiče: AAVID THERMALLOY – 241214B91200G

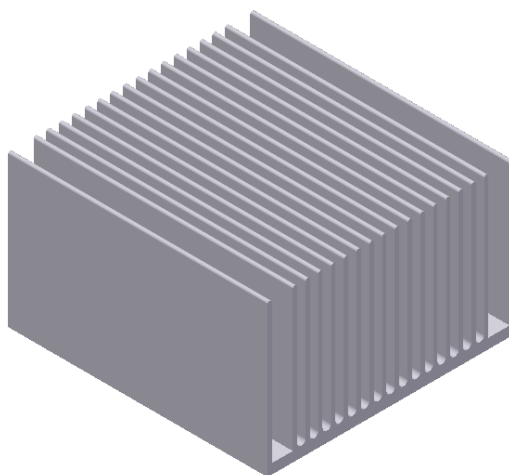
Parametry chladiče:  $R_{th\ h-a} = 1,1 K/W$

Maximální teplota přechodu se zvoleným chladičem:

$$T_j = P_{TOT} \cdot (R_{th\ j-c(celkový)} + R_{th\ h-a(chladěh)}) + T_a = \underline{101,4^\circ C} \quad (5.16)$$

povolená teplota u usměrňovacího modulu je  $T_j=125^\circ C$

Při volbě chladiče lze vybírat z několika typů chladičů. Zvolen byl chladič AAVID THERMALLOY – 241214B91200G, jelikož je vhodný na to, aby se na tento chladič dal umístit modul střídače a velikostně vyhovoval DPS.



*Obr. 5.6. Chladič AAVID THERMALLOY – 241214B91200G*

#### ***5.1.5. Navržené schéma výkonové části nepřímého měniče kmitočtu***

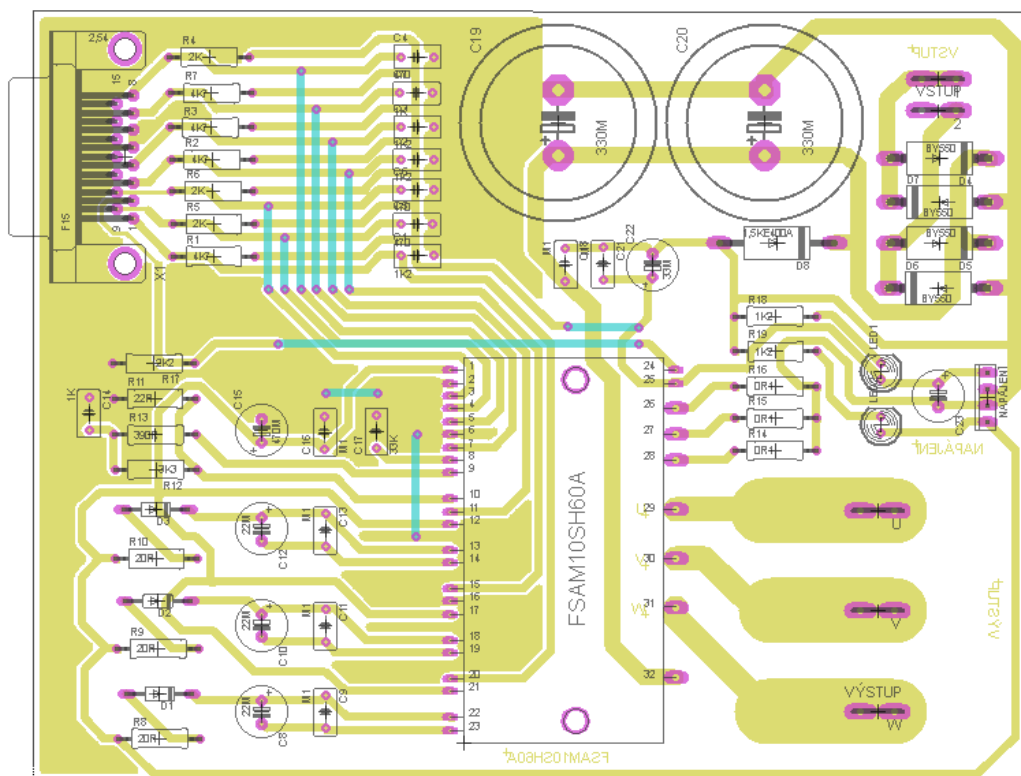
Viz. příloha 1

#### ***5.1.6. Popis schématu výkonové části nepřímého měniče kmitočtu***

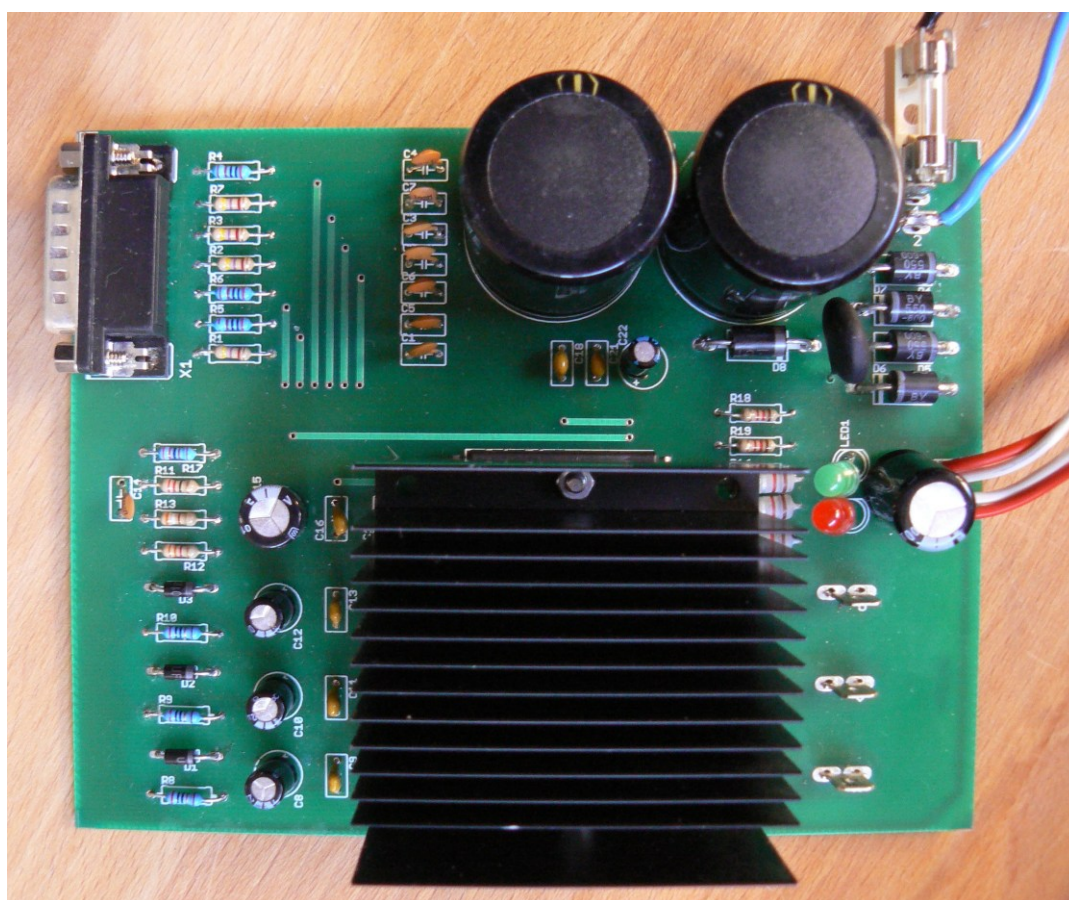
Viz. příloha 2

- 1**     *jednofázový usměrňovač v můstkovém zapojení*
- 2**     *stejnoseměrný meziobvod*
- 3**     *třífázový střídač*
- 4**     *napájení střídače*
- 5**     *odolnost proti rušení CSC pinu*
- 6**     *hodnoty odporů R8, R9, R10 a kondenzátorů C8, C9, C10 jsou závislé na řídicím algoritmu PWM*
- 7**     *odpory a kondenzátory sloužící k zabránění kmitání vstupních a výstupních signálů*
- 8**     *propojení výkonové části s řídicí částí*

### 5.1.7. Realizovaná deska výkonové části nepřímého měniče kmitočtu



Obr. 5.7. Navržená DPS řídicí části



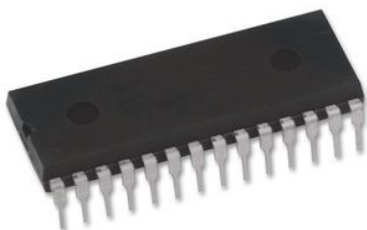
Obr. 5.8. Realizovaná DPS řídicí části



## 5.2. Řídicí část

### 5.2.1. Řídicí systém

Je tvořena řídicím systémem MC3PHAC.



Obr. 5.9. Řídicím systémem MC3PHAC

MC3PHAC (dále jen MC) je inteligentní řídicí systém pro regulaci rychlosti u třífázových střídačů.

Vlastnosti systému:

- *systém nevyžaduje žádný software,*
- *digitální zpracování signálu (DSP) pro zvýšení rychlosti filtrování stability,*
- *vysokorychlostní CMOS technologie,*
- *výstupní PWM modulátor,*
- *sériové komunikační rozhraní (SCI).*

MC lze využít pro řízení aplikací, jako jsou například:

- *domácí spotřebiče a myčky nádobí,*
- *čerpadla a ventilátory,*
- *řízení procesů.*

Ovšem nejčastěji využívané jsou k řízení motorů. Řízení systému lze provádět pomocí PC, nebo pomocí kontroléru.

Systém MC obsahuje:

- *PWM modulátor (6 výstupních pinů),*
- *analogově-digitální konvertor (čtyř kanálový),*
- *fázový závěs (PLL),*
- *sériové komunikační rozhraní (SCI).*

Funkce pro řízení motoru:

- *regulace otáček,*
- *START/STOP,*
- *chod motoru vpřed, nebo vzad,*
- *vyhodnocení chyby na vstupu,*
- *zvýšení napětí při nízkých otáčkách.*

Kromě těchto funkcí, MC vytváří šest PWM signálů, které byly modulovány s proměnným napětím a umožní zvýšení maximální výstupní amplitudy ve srovnání s čistě sinusovou modulací o 15%. Pro vysoce přesné výpočty a plynulý chod se používá 32-bitová rozlišovací proměnná. Rychlost i zrychlení MC systému lze regulovat v rozmezí 1 Hz/s až do 128 Hz/s. [8]

### **5.2.2. Navržené schéma řídicí části nepřímého měniče kmitočtu**

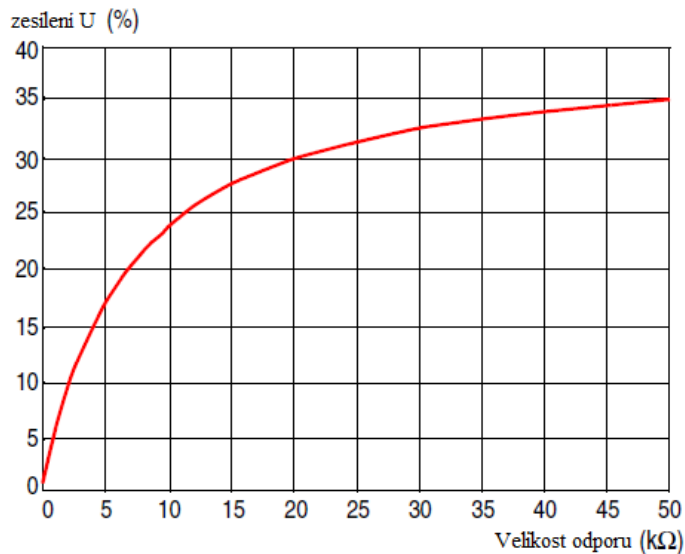
Viz. příloha 3

### **5.2.3. Popis schématu řídicí části nepřímého měniče kmitočtu**

Viz. příloha 4

- 1**     *systém MC3PHAC*
- 2**     *IC1A (AND hradlo) porovnává proud a teplotu, při stejných hodnotách se hradlo otevře a rozsvítí se LED dioda. Při různých hodnotách se hradlo neotevře a dioda nesvítí*
- 3**     *řízení motoru pomocí PC (obvod pro komunikaci s PC) – opticky izolované rozhraní*
- 4**     *přepínač PC/samostatný režim*
- 5**     *ošetření napájecích vstupů integrovaných obvodů*
- 6**     *regulace otáček motoru*
- 7**     *regulace akceleraace*
- 8**     *přepínač START/STOP*
- 9**     *přepínač chodu FOR/REV (dopředu/dozadu)*
- 10**    *regulace zesílení napětí (viz. Obr. 5.12.)*
- 11**    *regulace frekvence (viz. Tab. 5.1.)*
- 12**    *odpory pro ochranu proti kmitání signálu*
- 13**    *propojení řídicí části s výkonovou částí*

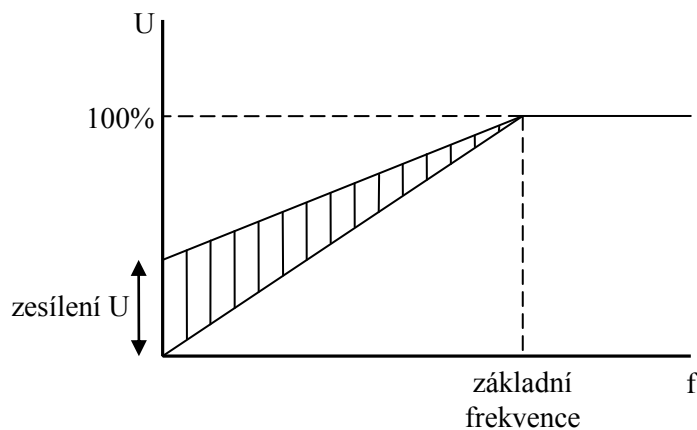




Obr. 5.12. Závislost zesílení napětí na velikosti odporu

Možnost nastavení napětíového zesílení, je z důvodu zvýšení statorového napětí. Při řízení AS motoru skalární metodou, je udržován konstantní magnetický tok, tedy je udržován konstantní poměr  $U/f$  a úbytek napětí způsobený ohmickým odporem statorového vinutí lze zanedbat. Ovšem při nízkých otáčkách se značně projevuje odpor statoru. Aby byl zajištěn konstantní magnetický tok, je třeba zvýšit statorové napětí.

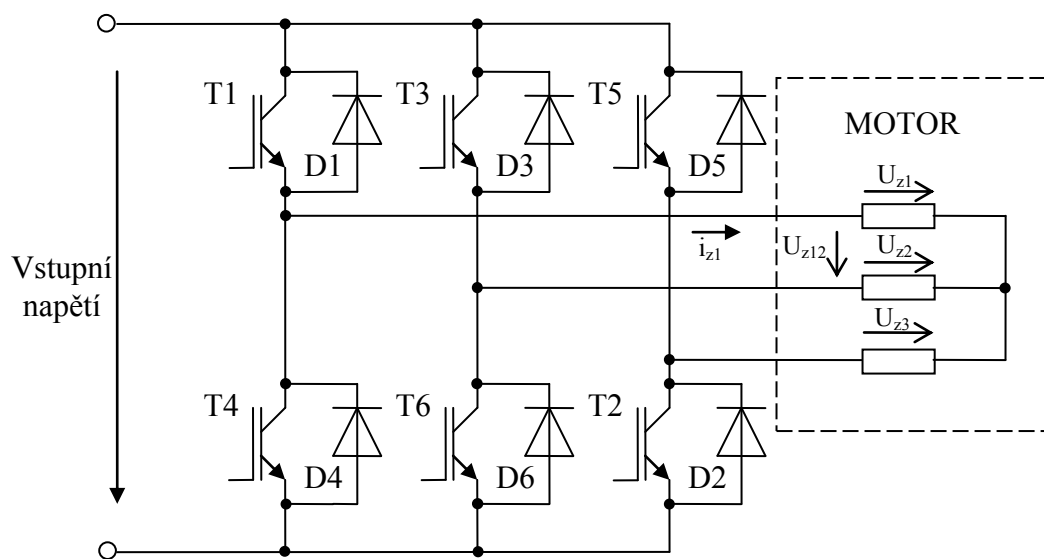
Jedná se o kompenzaci ztrát ve statoru. Řízení  $U/f$  je samozřejmě konstantní, nicméně upravuje se offset „ $U$ “ pro nulovou hodnotu „ $f$ “ dle křivky na Obr. 5.13.



Obr. 5.13. Zesílení napětí

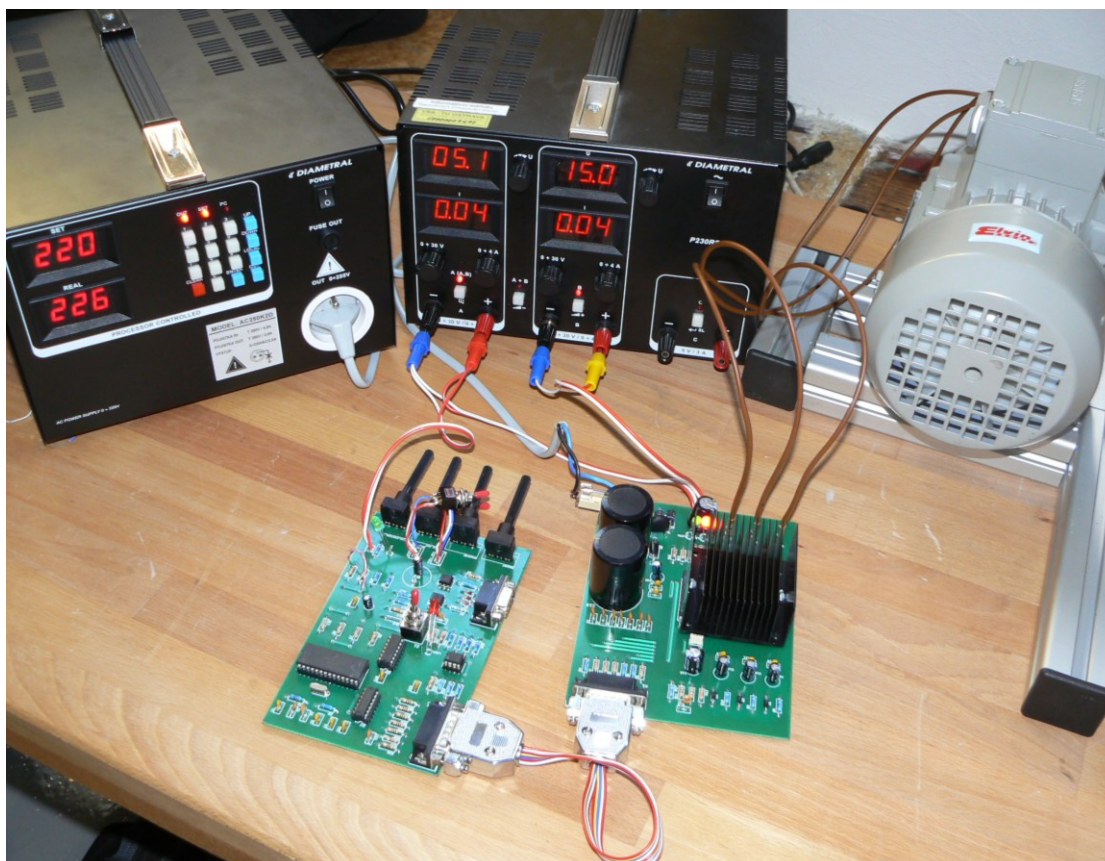
## 6. Měření

Jakmile byl měnič kmitočtu sestaven, ověřila se jeho funkčnost připojením výstupu na vstupy motoru. Na třífázovém motoru, zapojeném do hvězdy (Obr. 6.1.), byly naměřeny níže uvedené průběhy.



Obr. 6.1. Zapojení motoru

Kde:  $U_{z1}$  fázové napětí  
 $U_{z2}$  sdružené napětí  
 $i_{z1}$  fázový proud

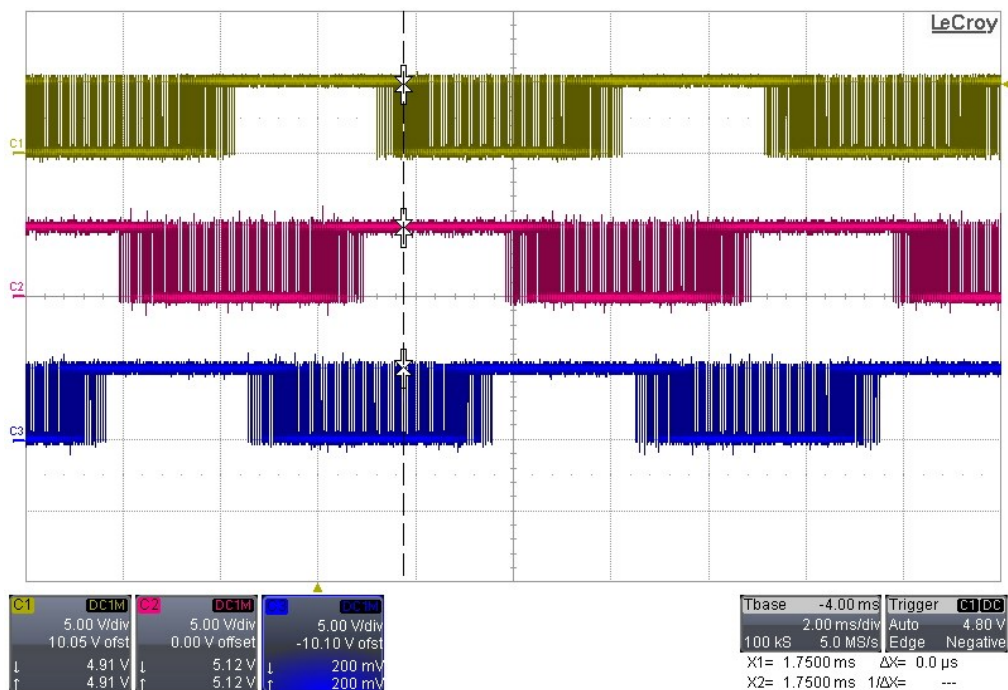


Obr. 6.1. Zapojení nepřímého měniče kmitočtu s asynchronním motorem



### 6.1. Měření řídicí části

Řídicí část slouží k přivádění impulsů na „GATEY“ IGBT tranzistorů. Impulsy, které slouží ke spínání jednotlivých tranzistorů pomocí PWM modulace, jejíž princip spočívá ve spínání výkonových prvků střídače tak, aby střední hodnota měla sinusový průběh, jsou přiváděny rovnou do střídače. Jelikož střídač je tvořen šesti IGBT prvky, z řídicí části vystupuje proto 6 impulsů.

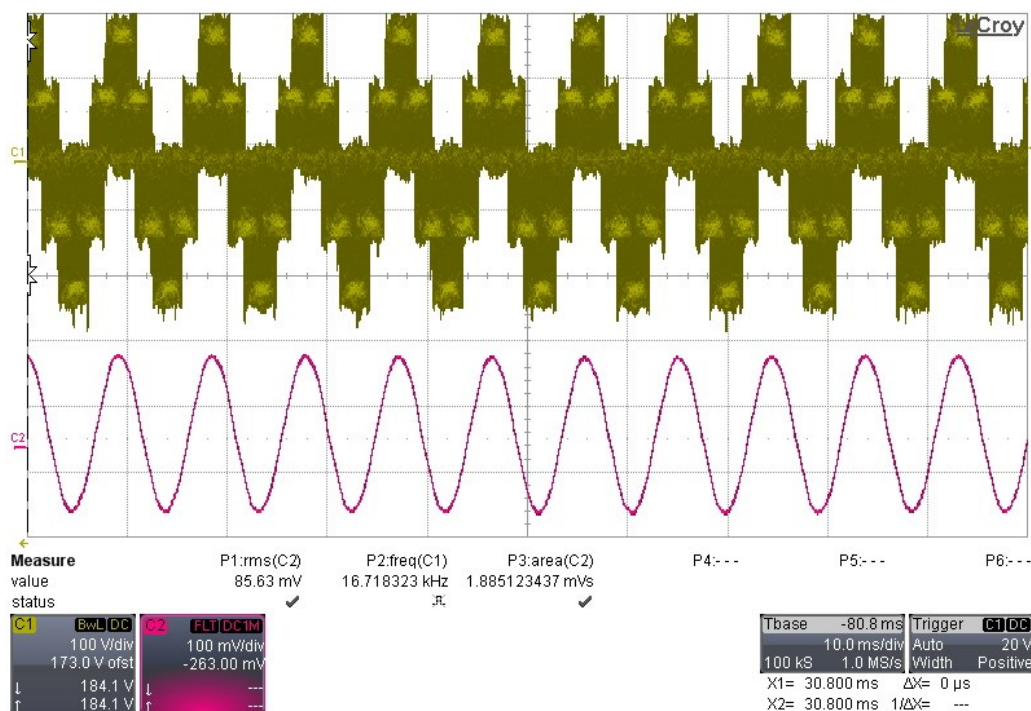


Obr. 6.2. PWM modulace pro tranzistory *T1*, *T3*, *T5*,

Na Obr. 6.2. lze vidět průběh PWM modulace pro horní spínací prvky v každé fázi střídače (*T1*, *T3*, *T5*).

### 6.2. Měření výkonové části

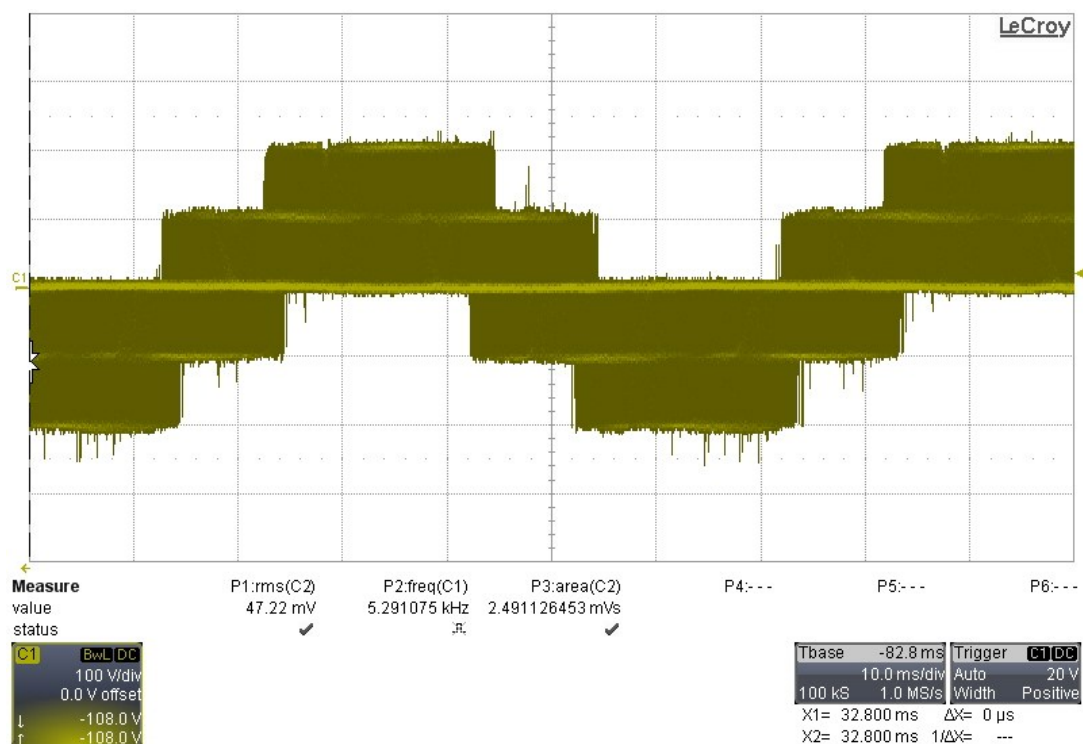
Jak již bylo dříve zmíněno, výkonová část se připojí na fáze motoru a zde jsou naměřeny veškeré níže uvedené průběhy, jak regulace otáček, tak spínací frekvence i akcelerace.



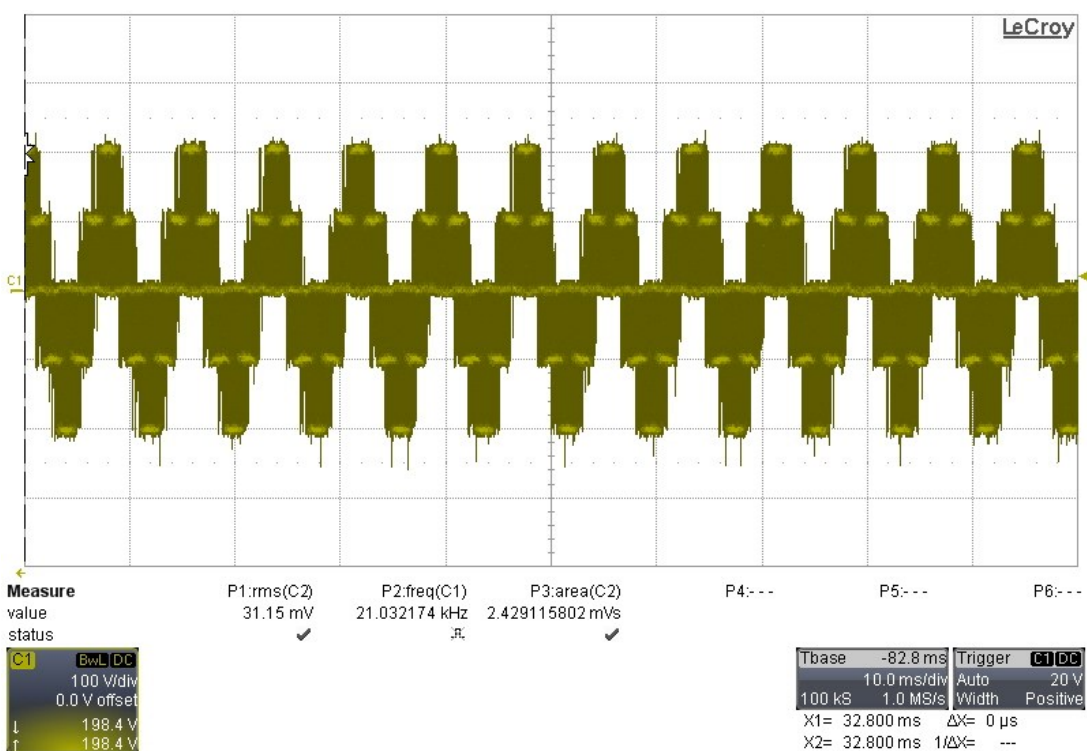
Obr. 6.3. Průběh *fázového napětí* a *fázového proudu* asynchronního motoru

### 6.2.1. Regulace otáček

Níže uvedené průběhy zobrazují jak sdruženého, tak fázového napětí motoru při nízkých a vysokých otáčkách motoru. Pro porovnání rychlostí měřené osciloskopem, je časová základna stejná. „S rostoucí rychlostí, roste počet period napětí.“

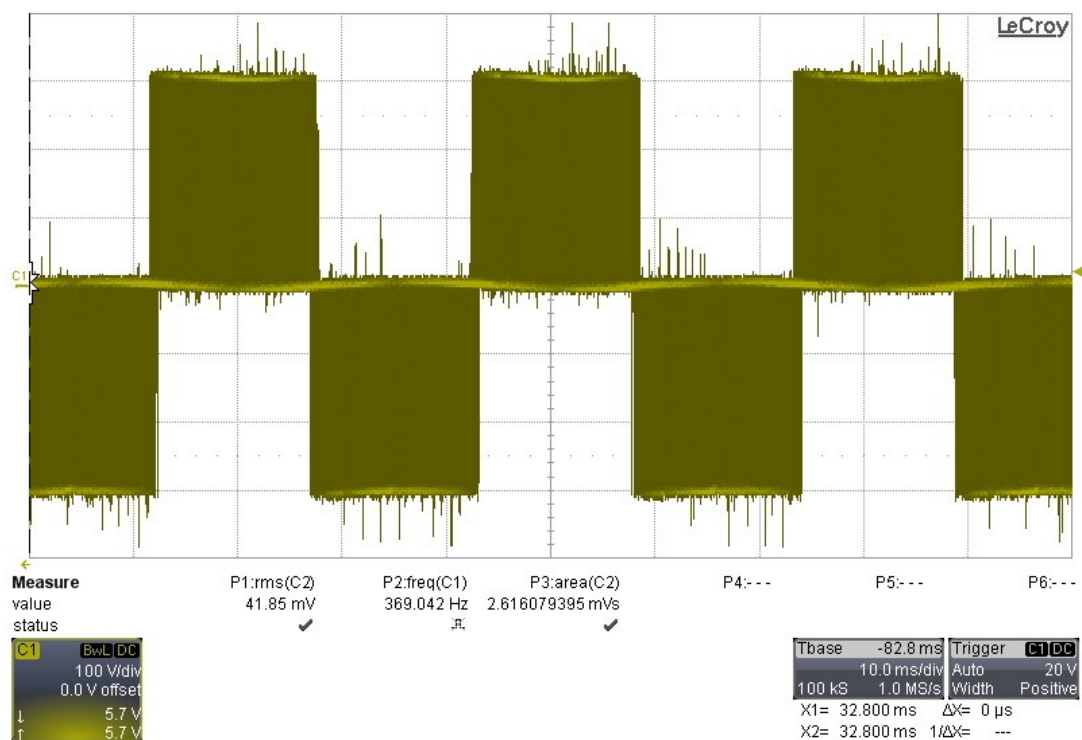


Obr. 6.4. Průběh fázového napětí asynchronním motoru při nízkých otáčkách

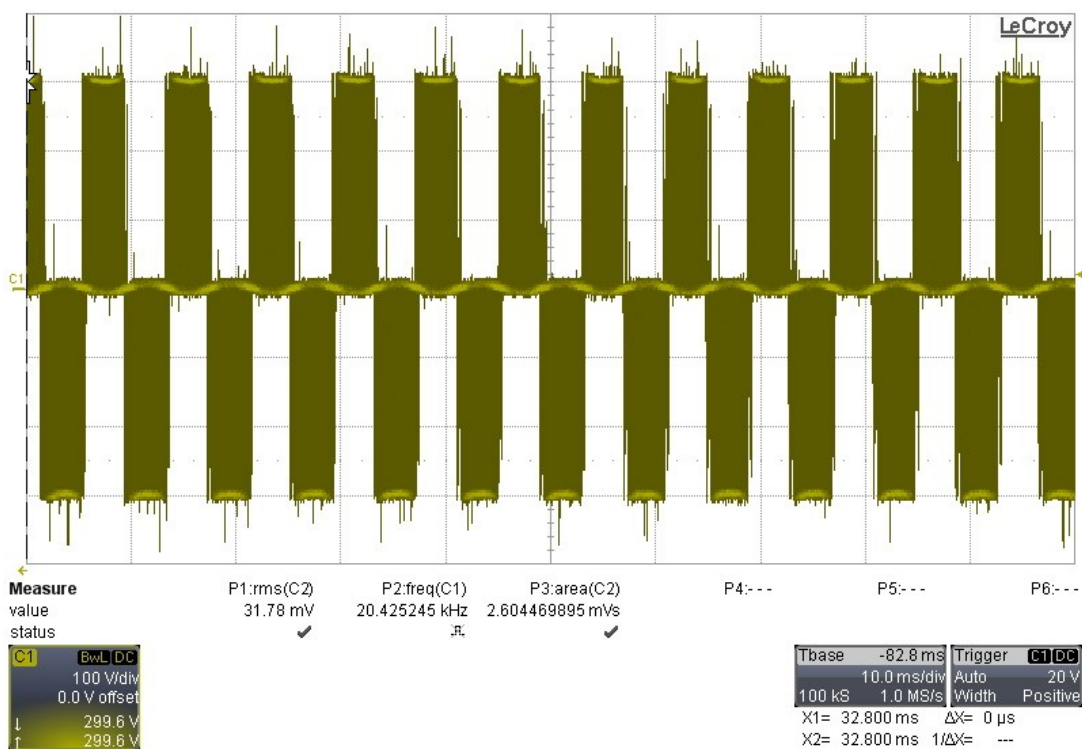


Obr. 6.5. Průběh fázového napětí asynchronním motoru při vysokých otáčkách





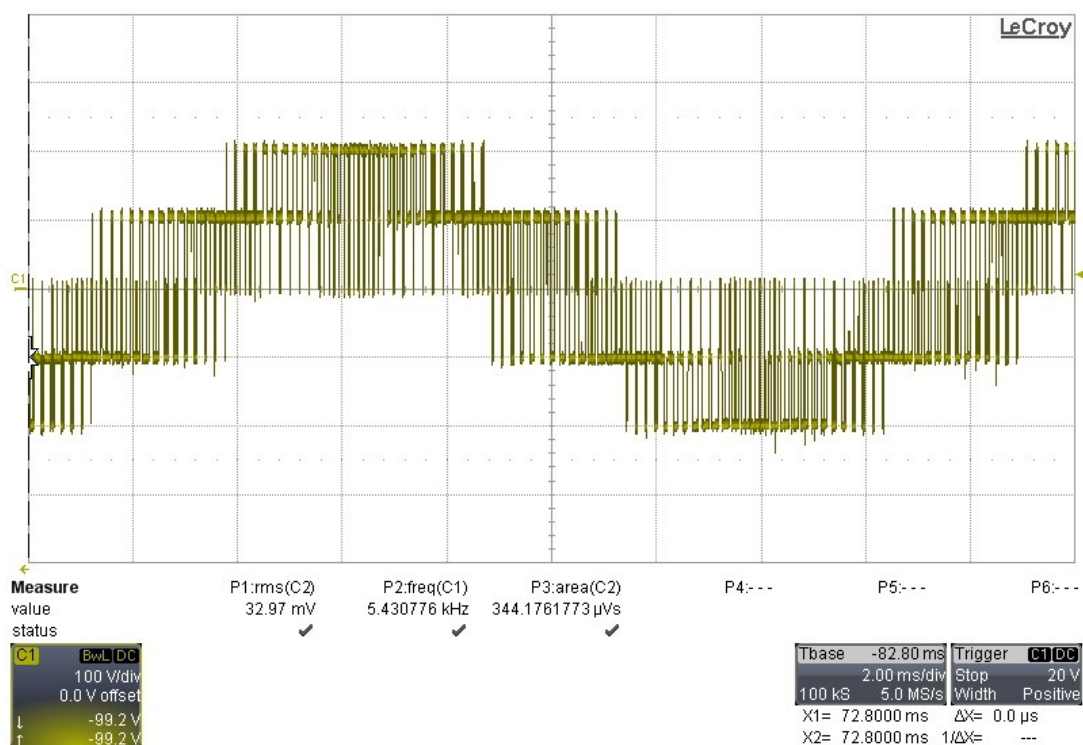
Obr. 6.6. Průběh sdruženého napětí asynchronním motoru při nízkých otáčkách



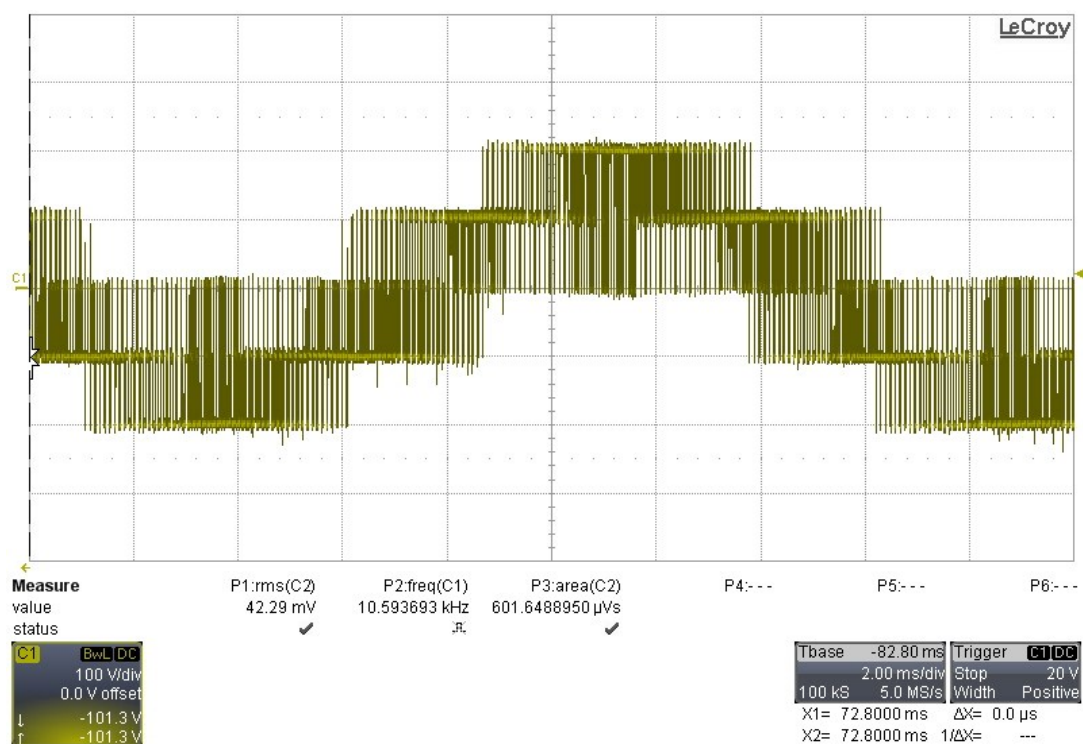
Obr. 6.7. Průběh sdruženého napětí asynchronním motoru při vysokých otáčkách

### 6.2.2. Spínací frekvence

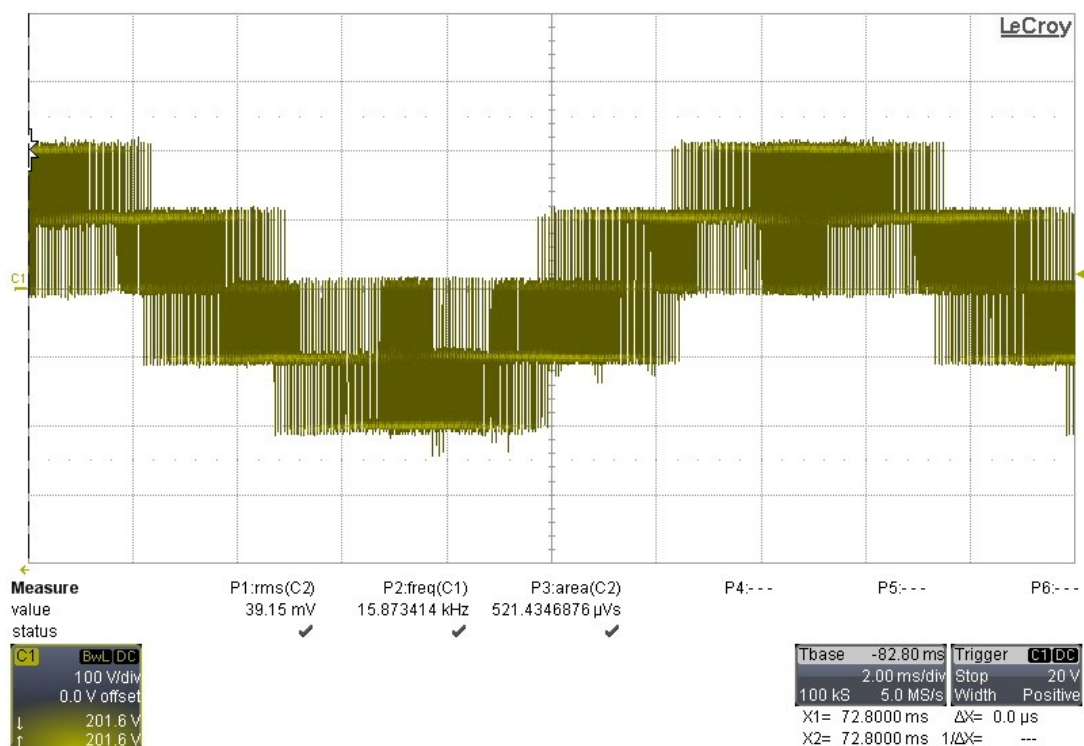
Spínací frekvenci lze měnit v rozmezí 5, 10, 15 a 20kHz, jak udává výrobce procesoru.



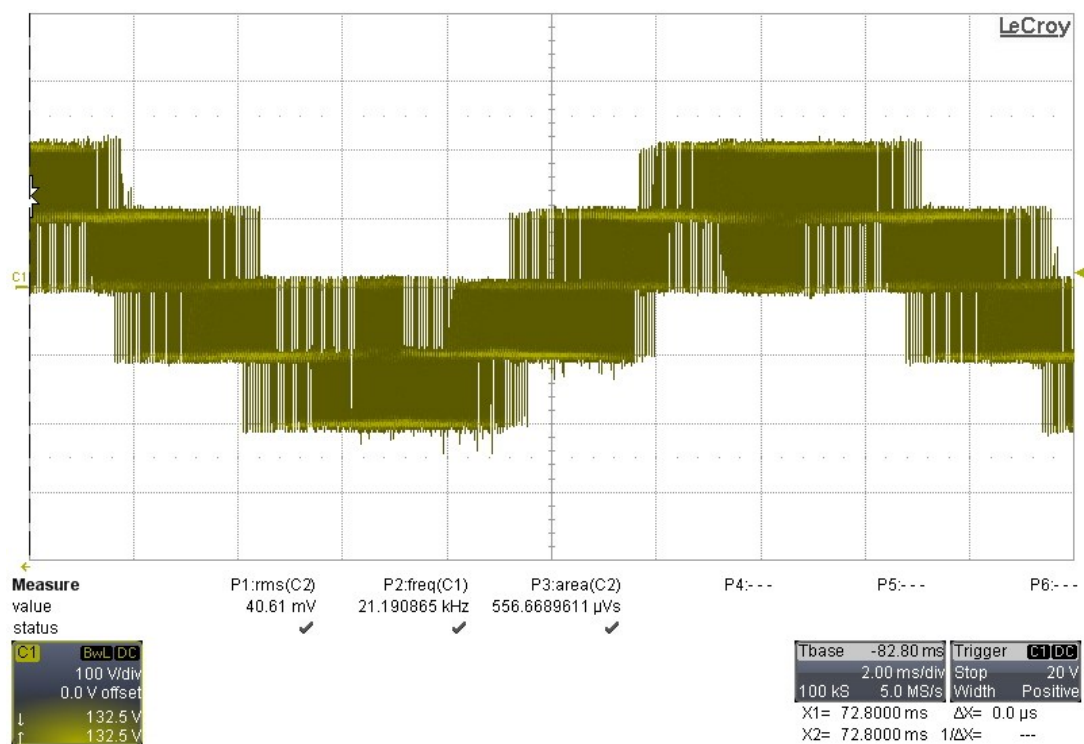
Obr. 6.8. Průběh fázového napětí asynchronního motoru při spínací frekvenci 5kHz



Obr. 6.9. Průběh fázového napětí asynchronního motoru při spínací frekvenci 10kHz



Obr. 6.10. Průběh fázového napětí asynchronního motoru při spínací frekvenci 15kHz



Obr. 6.11. Průběh fázového napětí asynchronního motoru při spínací frekvenci 20kHz

## 7. Typizovaná laboratorní úloha

Jakmile byl model zkompletován a byla ověřena funkce nepřímého měniče kmitočtu, byla navržena laboratorní úloha.

Laboratorní úloha je zaměřena na vlastnosti snímačů otáček a polohy používaných v automobilové technice, a ověření jejich funkcí pomocí sestaveného modelu. Zadání laboratorní úlohy bylo sestaveno dle pokynů vedoucího diplomové práce, kde se student postupně seznámí s vlastnostmi snímačů. Zadání lze rozdělit na dvě části, kde v první části se student seznámí se statickými vlastnostmi snímačů a druhá část je zaměřena na dynamické vlastnosti.

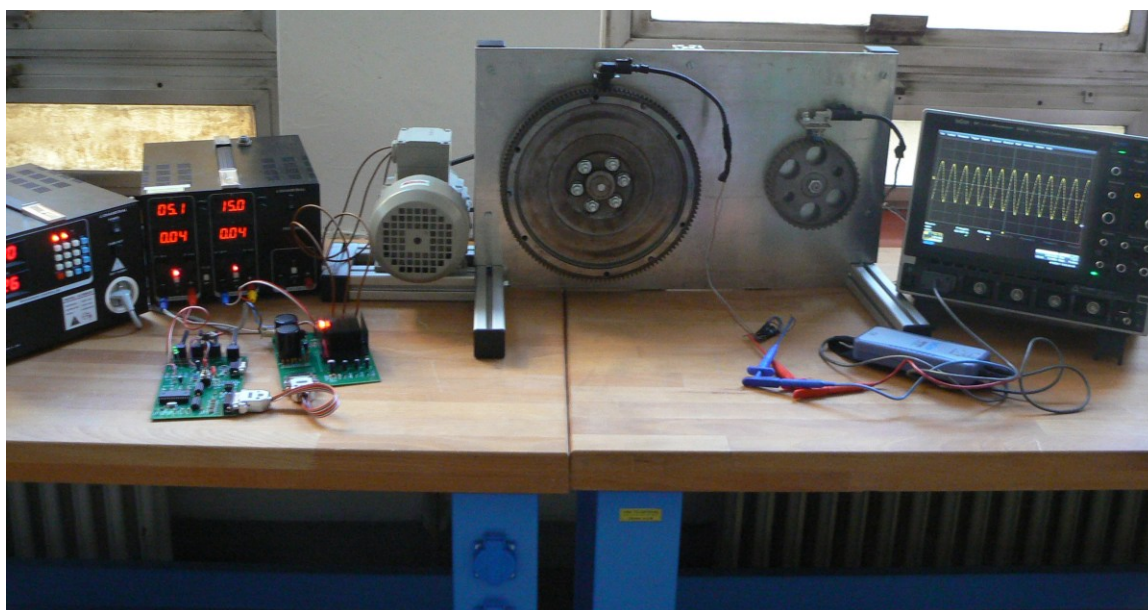
Laboratorní úlohu tvoří:

- *hlavička,*
- *zadání,*
- *teoretický úvod,*
- *schéma zapojení.*

Laboratorní úlohu lze nalézt v příloze, kde se nachází i kompletní vzorový protokol.

Vzorový protokol tvoří:

- *hlavička,*
- *zadání,*
- *teoretický úvod,*
- *schéma zapojení,*
- *použité přístroje,*
- *postup měření,*
- *závěr.*



Obr. 7.1. Pohled na měření na laboratorním stanovišti

## 8. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout pohonnou jednotku laboratorního přípravku pro měření vlastností snímačů otáček a polohy. Ověřit funkčnost pohonné jednotky a zpracovat průvodní dokumentaci k laboratorní úloze, jelikož daný model bude sloužit pro laboratorní výuku předmětu automobilová elektronika II. V této práci je uveden i popis určitých snímačů.

Kromě popisu snímačů jsou zde zahrnuty i popisy jednotlivých částí pohonné jednotky a celého poháněného mechanismu (kap. 2. – kap. 4.). Další kapitola je již zaměřena na návrh a realizaci pohonné jednotky. Po návrhu a realizaci reálné pohonné jednotky laboratorního přípravku, bylo provedeno měření správné funkčnosti celého mechanismu (kap. 6.). Jakmile byla ověřena funkčnost, byla zhotovena průvodní dokumentace k laboratorní úloze a vypracovaný vzorový protokol (viz. příloha).

Diplomová práce byla splněna ve všech bodech zásad pro vypracování. A hlavní přínos této diplomové práce je ve vytvoření měřícího stanoviště pro měření snímačů polohy a otáček, ale také pro měření na vadném snímači, měření vzájemného úhlu natočení klikové a váčkové hřídele, sledování vlivu křivého zubu ozubení, nebo chybějícího zubu ozubení na výstupní signál a mnoho dalších měření, jelikož tento model lze použít pro mnoho dalších měření snímačů.

### **Použitá literatura:**

- [1] URL: <[http://fei1.vsb.cz/kat430/data/ae/Cidla\\_snimace\\_ovladaci%20prvky.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat430/data/ae/Cidla_snimace_ovladaci%20prvky.pdf)> [cit. 2011-01-22]
- [2] Javůrek, Jiří.: Regulace moderních elektrických pohonů, Grada Publishing, a.s., 2003
- [3] Katalog K02 – 0605 CZ
- [4] Chlebiš, Petr.: Výkonová elektronika I. Ostrava 2003.
- [5] Vondrášek, František.: Výkonová elektronika svazek 3. Plzeň 2003.
- [6] Brandštetter, Pavel.: Elektrické regulované pohony III. Ostrava, 2005.
- [7] URL: <<http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9043.pdf>> [cit. 2011-03-01]
- [8] URL:  
<[http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data\\_sheet/MC3PHAC.pdf?fsrch=1&sr=1](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC3PHAC.pdf?fsrch=1&sr=1)> [cit. 2011-03-01]
- [9] Roh, V.: Snímače otáček a polohy pro oblast automobilového průmyslu. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010.

### **Příloha:**

- Příloha 1: *Navržené schéma výkonové části nepřímého měniče kmitočtu*
- Příloha 2: *Popis schématu výkonové části nepřímého měniče kmitočtu*
- Příloha3: *Navržené schéma řídicí části nepřímého měniče kmitočtu*
- Příloha 4: *Popis schématu řídicí části nepřímého měniče kmitočtu*
- Příloha 5: *Průvodní dokumentace k laboratorní úloze*
- Příloha 6: *Vzorový protokol*